ACADEMIA NORTEAMERICANA
DE CIENCIAS

FISICA NUCLEAR

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

ACADEMIA NORTEAMERICANA DE CIENCIAS

FISICA NUCLEAR

SALVAT

Versión española de la obra original inglesa
Nuclear Physics publicada por
National Academy y Press
Washington, D.C. 1986
Traducción: Jordi Sern

Edición digital: Sargont (2018)

ISBN 0-309-03547-3 Edición original
ISBN 84-345-8246-5 Obra completa
ISBN 84-345-8457-3
Depósito Legal NA-833- 1987
Publicado por Salvat Editores, S.A. - Mallorca, 41-49 – Barcelona
Impreso por Gráficas Estella. Estella (Navarra)
Printed in Spain

Índice

Introducción

Este volumen está dedicado íntegramente al informe emitido por la Comisión de Física Nuclear (Panel on Nuclear Physics) del Comité de Seguimiento de la Física (Physics Survey Committee), fundado por el Consejo Nacional de Investigación (National Research Council) en 1983. Este informe presenta muchos de los avances más importantes producidos en Física Nuclear durante la década anterior, esboza su impacto en la sociedad y en otras ciencias, y describe los problemas que existen en este campo de la ciencia. El libro concluye con un capítulo acerca de las prioridades que se recomiendan mantener en torno a esta disciplina.

La Comisión de Física Nuclear elaboró este informe a partir de las reuniones de mayo de 1983 enero de 1984 y a través de una extensa correspondencia. También se obtuvo información del Comité Asesor sobre Ciencia Nuclear (Nuclear Science Advisory Committee: NSAC) del Departamento de Energía y la Fundación Nacional para la Ciencia (National Science Foundation) durante la semana de sesiones celebrada en julio de 1983, cuando se esbozó el esquema general de su Plan a Largo Alcance de 1983. El Apéndice B muestra la lista de aquellos que asistieron a las sesiones, en las que, además, participaron otros miembros aparte de los del NSAC o de nuestra comisión.

La mayoría de los comentarios emitidos por los 11 ponentes (ver Apéndice B), que fueron escogidos de modo que pudieran proporcionar un punto de vista representativo de la comunidad científica nuclear, se incorpora a este manuscrito, el cual fue enviado al Consejo Nacional de Investigación en mayo de 1984 para su posterior revisión. Los comentarios adicionales fueron subsiguientemente incorporados, y el manuscrito final estuvo listo en agosto de 1984.

Evidentemente, es imposible cubrir el campo de la Física Nuclear de forma exhaustiva con un informe del tamaño de este libro. Por lo tanto, aquí sólo puede proporcionarse un panorama de algunos temas selectos, entre los que la Comisión ha intentado mantener un equilibrio temático razonable. Aunque en este informe no se hace referencia explícita a la química nuclear, es necesario resaltar que los químicos y físicos nucleares trabajan para conseguir el mismo objetivo: comprender el núcleo. Por lo

tanto, ambos poseen los mismos intereses comunes y comparten las mismas instalaciones.

La Comisión desea dar las gracias tanto a los ponentes como a los miembros del Comité de Seguimiento de la Física, del Equipo de Física y Astronomía del Consejo Nacional de Investigación, y a muchas otras personas que han contribuido a esta tarea. Damos las gracias especialmente a Fred Raab por su valiosa ayuda en la escritura y edición de este informe.

Resumen ejecutivo

LA FÍSICA NUCLEAR ACTUAL

El objetivo de la Física Nuclear es el estudio de las propiedades de los núcleos atómicos, su estructura, sus interacciones y las leyes que gobiernan las fuerzas que ejercen sus constituyentes. Las interacciones de los núcleos están enraizadas en las de las partículas elementales, los quarks y los gluones, los cuales constituyen la materia nuclear. No obstante, algunas fuerzas dinámicas adicionales, cuya existencia se conoce desde hace tiempo, no pueden entenderse únicamente a base de partículas elementales. Una situación similar tiene lugar en el caso de algunas interacciones cooperativas, que se sabe existen en los materiales macroscópicos y que no son identificables en los núcleos o átomos.

Los problemas básicos con que se enfrenta actualmente la física nuclear cubren un amplio espectro que incluye a las fuerzas electrodébil y fuerte, y, al mismo tiempo, abarcan propiedades del mundo físico que van desde la escala microscópica de las fuerzas nucleares a las estructuras a gran escala del Universo. La física nuclear además de jugar un papel importante en el campo de la astrofísica y de la cosmología, trata aspectos de la interacción fuerte entre muchos cuerpos y realiza comprobaciones de teorías fundamentales y simetrías.

La comprensión actual de la estructura y de la dinámica nuclear continúa evolucionando. Ya han aparecido nuevos modos simples de excitación, nuevas simetrías, y se están descubriendo fenómenos completamente desconocidos.

En la década de los 70, por ejemplo, se descubrieron varios modos de vibración de los núcleos gracias a la utilización de la técnica de la dispersión inelástica por núcleos blancos de partículas cargadas. Una de estas vibraciones, la monopolar gigante, es particularmente significativa debido a su relación directa con la compresibilidad de la materia nuclear, la cual no había sido medida hasta la fecha. En estudios similares que utilizaban piones como proyectiles, se ha obtenido importante información acerca de los papeles desempeñados por los protones y neutrones en las vibraciones nucleares, así como la de los estados excitados denominados deltas.

El empleo de núcleos en la dispersión de electrones de alta energía ha revelado detalles sin precedentes de la estructura nuclear, no sólo en términos de nucleones, sino también de los mesones presentes de los núcleos y, aunque en un grado más rudimentario, de los quarks que componen todas estas partículas. Tales estudios constituyen una de las fronteras más importantes de la física nuclear actual.

En el extremo opuesto del tamaño de los proyectiles, los iones pesados se emplean cada vez más debido a su versatilidad como sondas de la dinámica nuclear. Su impacto masivo sobre el núcleo blanco puede causar una gran variedad de excitaciones y reacciones, cuyo análisis es de un valor incalculable para comprender los diferentes tipos de movimientos de los nucleones en el interior del núcleo. Las colisiones de los iones pesados también han sido indispensables para producir muchas especies nucleares exóticas, incluyendo cuatro nuevos elementos químicos (del número 106 al número 109) descubiertos durante la década de los 80.

Es necesario destacar que prácticamente toda la investigación que se ha realizado en física nuclear hasta la fecha, sólo ha podido ser efectuada dentro del limitado campo que ofrecen las temperaturas nucleares bajas y las densidades nucleares normales. La exploración del vasto campo de la física de los núcleos a alta temperatura y alta densidad está empezando a ser estudiada gracias al uso de proyectiles formados por iones pesados que poseen energías relativistas. Esta es otra de las grandes fronteras del campo científico.

Continua e inevitablemente surgen nuevos problemas que ponen a prueba la comprensión actual de la física nuclear. Por ejemplo, aunque es posible explicar ciertos fenómenos nucleares en términos de la presencia de mesones (junto con protones y neutrones) en el interior del núcleo, todavía no se han podido resolver las correspondientes ecuaciones de la cromodinámica cuántica (el campo de la teoría cuántica que se cree gobierna la manera de interactuar de estas partículas) que describen los efectos mencionados.

Los esfuerzos que se realizan actualmente para resolver este problema son particularmente importantes puesto que proporcionan una visión mucho más profunda acerca de una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, la denominada fuerza fuerte. Es más, el núcleo es un laboratorio único que está preparado para investigar las relaciones existentes entre las

fuerzas fundamentales, así como sobre los principios de simetría subyacentes a los fenómenos físicos. Su papel clave para modelar la visión que se posee del Cosmos es evidente en el campo de la astrofísica nuclear, la cual proporciona información vital para comprender el origen y la evolución de las estrellas y del propio Universo. En la Tierra, mientras tanto, la medicina nuclear (incluyendo el desarrollo y utilización de radioisótopos y haces de partículas aceleradas específicamente diseñados para el diagnóstico y procedimientos terapéuticos), la energía nuclear (fisión y fusión), la modificación y análisis de materiales (por ejemplo, la implantación de iones y la fabricación de microcircuitos semiconductores), los trazadores radiactivos (utilizados en disciplinas científicas que van desde la geofísica a la medicina física), así como muchas aplicaciones industriales rutinarias (incluyendo, por ejemplo, los cortes de precisión de muestras mediante aceleradores nucleares en miniatura o la preservación de comida por irradiación y endurecimiento de moldes mediante la implantación de iones para reducir el desgaste) e incluso el análisis de los objetos de arte, constituyen sólo unos cuantos ejemplos de cómo los frutos de la investigación nuclear han encontrado una multitud de aplicaciones útiles y, a menudo, sorprendentes en otras ciencias fundamentales y en tecnologías modernas, muchas de las cuales tienen un impacto directo y significativo en la sociedad.

Una buena parte de este trabajo de investigación ha sido realizado con aceleradores de partículas de varios tipos. Algunos estudios requieren grandes equipos de investigadores y aceleradores de alta energía, que se encuentran habitualmente en laboratorios nacionales, mientras que otros, de baja energía, continúan siendo realizados por universidades —típicamente por un profesor y varios estudiantes de doctorado— que utilizan aceleradores más pequeños o equipos a escala de laboratorio. Ambos producen avances importantes en física nuclear.

Este amplio abanico de necesidades en medios y recursos humanos es una de las características de la física nuclear. Mantener el equilibrio adecuado entre los programas de investigación de grupos grandes y pequeños es esencial para el progreso global de esta disciplina. Igualmente importante es el equilibrio entre la investigación experimental y teórica, así como la disponibilidad de instrumentación moderna y de computadores para realizar programas adecuados.

Los avances más importantes de la física nuclear durante la década de los 80 y las interesantes perspectivas para su futuro —así como algunas de las miles de maneras en que la física nuclear influye en otras ciencias y en toda la sociedad— constituyen el objetivo de este informe.

RECOMENDACIONES PARA EL FUTURO DE LA FÍSICA NUCLEAR

Al formular las recomendaciones para el futuro de la física nuclear, tal como se presentan más adelante, el Comité de Física Nuclear (Panel on Nuclear Physics) ha aprovechado las estrechas interacciones entre sus miembros y los participantes en el Taller de Planificación a Largo Alcance de 1983 (1983 Long Range Planning Workshop) de la Comisión Asesora sobre Ciencia Nuclear (Nuclear Science Advisory Committee: NSAC) del Departamento de Energía de los Estados Unidos y de la Fundación Nacional para la Ciencia (National Science Foundation).

Los aceleradores son la herramienta básica en la investigación de la física nuclear. La planificación, diseño y construcción de excelentes aceleradores y de aparatos adicionales de experimentación es cada vez más importante para la comunidad de físicos nucleares. Los diseños deben estar optimizados para permitir la realización de aquellos programas que tengan mayor probabilidad de producir nuevos resultados en áreas críticas de investigación y de satisfacer las necesidades del mayor número posible de usuarios. Actualmente existen dos grandes aceleradores, de naturaleza complementaria, cuya construcción ha sido recomendada por el NSAC.

El acelerador continuo de haces de electrones

En abril de 1983, el NSAC recomendó la construcción de un conjunto formado por un acelerador lineal y un anillo de almacenamiento de 4 G*e*V de actividad continua, denominado *«Continuous Electron Beam Accelerator Facility»* (CEBAF), a propuesta de la Asociación de Investigación de las Universidades del Sureste. La financiación para la investigación y desarrollo de esta máquina empezó en 1984, y la financiación para su construcción en 1987. El coste total previsto del acelerador es de 225 millones

de dólares, en el que están incluidos 40 millones de dólares para el equipo experimental inicial.

Uno de los principales objetivos de la investigación en física nuclear del CEBAF lo constituirá la investigación de los aspectos microscópicos quark-gluon de la materia nuclear (el régimen de altas energías, elevadas transferencias de momento y pequeñas distancias), mediante el uso de haces de electrones que sondearán, con la precisión de un cirujano, la dinámica detallada de las partículas en un núcleo determinado. No obstante, la investigación de los aspectos barión-mesón de la materia nuclear (el régimen de bajas energías, bajas transferencias de momento y mayores distancias) también serán de gran importancia. En particular, su valor resultará inapreciable a la hora de estudiar la naturaleza de las transiciones desde la región de baja energía de las interacciones nucleón- nucleón (descrita mediante modelos de estructura nuclear formados por partículas independientes) hasta el régimen de energías intermedias de las resonancias bariónicas y corrientes de intercambio de mesones (descritas por la teoría cuántica de campos de las interacciones hadrónicas en los núcleos) y al régimen de alta energía de los quarks y de los gluones (descritos por la electrodinámica cuántica).

Para llevar a cabo estos y otros estudios es necesario un haz de energía variable (desde 0,5 a 4 G*e*V) del CEBAF. También es necesario su factor de actividad del 100% operación continua, de manera que puedan efectuarse medidas de coincidencia, las cuales son vitales para seleccionar los canales particulares y las variables objetos de estudio. Por lo tanto, las capacidades únicas del CEBAF proporcionarán oportunidades sin precedentes para examinar de forma muy detallada los diferentes niveles de la estructura de la materia nuclear.

La segunda iniciativa prioritaria: El colisionador nuclear relativista

En el Plan de Largo Alcance de 1983 del NSAC *(A Long Range Plan for Nuclear Science: A Report by the DOE/NSF Nuclear Science Advisory Committee*, diciembre de 1983) se recomienda la construcción de un acelerador colisionador de haces de iones pesados relativistas de energía variable. Una máquina de estas características está considerada por el NSAC

como el siguiente proyecto de más alta prioridad después de la construcción del CEBAF. El proyecto hace referencia a un colisionador de una energía de unos 30 G*e*V por nucleón en cada haz; su coste total estimado sería de unos 250 millones de dólares aproximadamente (en dólares de 1983).

La imperiosa necesidad de un acelerador de estas características proviene de una de las predicciones más importantes de la cromo- dinámica cuántica, la cual sostiene que, bajo temperaturas y densidades suficientemente altas, se producirá una transición desde la materia hadrónica excitada a un plasma de quarks y gluones, en el que los quarks, antiquarks y gluones que componen los hadrones dejarían de estar confinados y serían capaces de moverse libremente. Se cree que el plasma de quarks y gluones debió existir durante los primeros microsegundos después de la gran explosión, y que todavía puede estar presente en el núcleo de las estrellas de neutrones, aunque nunca ha sido observado desde la Tierra. Su producción en el laboratorio sería, por lo tanto, un logro científico de valor incalculable que reuniría elementos de física nuclear, física de partículas, astrofísica y cosmología.

Actualmente, la única manera concebible de producir las condiciones necesarias para conseguir el desconfinamiento de los quarks consiste en provocar la colisión frontal de núcleos muy pesados que posean energías relativistas, produciendo de esta forma enormes temperaturas y densidades nucleares dentro del volumen relativamente grande de dos núcleos. La capacidad de los quarks y gluones para moverse dentro de este volumen permitiría comprobar aspectos fundamentales de la cromodinámica cuántica a grandes distancias ya que se cree que pueden observarse algunos rasgos exóticos de los quarks desconfinados, tales como la producción de muchas partículas «extrañas» y antibariones.

Además de los experimentos basados en la colisión de haces, el empleo del colisionador relativista nuclear (RNC) en la modalidad de blanco fijo y energía variable permitiría realizar una gran variedad de importantes programas de investigación en física nuclear de alta energía, astrofísica nuclear y física atómica. Entre estos destacados estudios, se encontrarían aquellos encaminados a obtener mayor información sobre un tema de fundamental importancia como es la ecuación de estado de la materia nuclear a alta densidad y temperatura.

El Comité apoya el proyecto del Plan de Largo Alcance de 1983 del NSAC para que se planifique la construcción de este acelerador, que debería empezar tan pronto como fuera posible, manteniendo la compatibilidad con la construcción del acelerador de electrones de 4 G*e*V mencionado anteriormente. En torno al tema de la financiación en este tipo de proyectos sería recomendable un incremento de los fondos de explotación destinados a la física nuclear, con el objeto de que sean suficientes, no sólo para mantener la investigación y desarrollo del acelerador, sino también los programas de investigación que se efectúen con las nuevas instalaciones.

Instalaciones para objetivos adicionales

Los problemas más acuciantes con los que habitualmente se enfrenta la física nuclear (incluyendo la astrofísica nuclear) apuntan hacia un cierto número de importantes objetivos científicos que están más allá del alcance de las instalaciones experimentales existentes o en construcción. Muchos de estos objetivos podrían alcanzarse si se llevaran a cabo unas cuantas mejoras de los medios existentes que proporcionan la capacidad de investigación. Las decisiones concernientes a las prioridades relativas en torno a dichas mejoras (de las que una buena parte está tratada en el presente informe) deberían tomarse más adelante, en el momento adecuado.

Debe señalarse que una parte importante de estos objetivos científicos podrían quedar cubiertos mediante la construcción de un gran acelerador multiusuario, que incluyera un sincrotrón capaz de producir haces de protones muy intensos a energías superiores a las decenas de G*e*V, seguido de un anillo de almacenamiento que mantuviera una fuente casi continua de protones capaz de producir haces secundarios de piones, kaones, muones, neutrinos y antinucleones. Por lo general, las intensidades de estos haces deberían ser 50 o 100 veces mayores que las conseguidas en cualquier otro lugar, permitiendo de esta forma una mejora sustancial de la precisión y sensibilidad de una amplia clase de experimentos situados en la frontera que separa la física nuclear y la física de partículas.

Aunque la financiación de un acelerador de estas características no ha sido proyectada por el NSAC debido al compromiso adquirido con los aceleradores de electrones y de iones pesados mencionados más arriba, su

construcción es una opción importante a considerar en el futuro, debido a las oportunidades científicas únicas que proporcionaría su utilización.

Instrumentación nuclear

La financiación continua y adecuada de la instrumentación de la física nuclear constituye un serio problema. El Plan de Largo Alcance de 1983 del NSAC hace notar que la cantidad gastada en la investigación de la física nuclear básica respecto al Producto Nacional Bruto por Estados Unidos es inferior a la mitad del que invierte Europa Occidental o Canadá. Los efectos de esta disparidad pueden verse fácilmente en la calidad y sofisticación de la instrumentación europea, la cual, en muchos casos, sobrepasa de lejos a la que se encuentra en las universidades y los laboratorios estadounidenses. Por lo tanto, se considera esencial un aumento de la financiación dedicada a la construcción de instrumentos, tanto en las instalaciones grandes como pequeñas.

Teoría nuclear

Cuanto mayor es la conexión entre la teoría y la experimentación, y cuanto mayor es el equilibrio entre ambas, mayor es su eficacia a la hora de sintetizar un cuerpo de conocimientos coherente. A pesar de que el Plan de Largo Alcance de 1979 del NSAC subrayó la necesidad de un aumento en el apoyo a la teoría nuclear, una comparación entre el presupuesto federal de 1984 y el de 1979 para la física nuclear muestra que, durante estos 5 años, la financiación de la teoría nuclear ha permanecido constante con respecto al total (el 5,8% frente al 6% de 1979). Por lo tanto, todavía existe una clara necesidad de un incremento relativo sustancial en la financiación de la teoría nuclear, especialmente a la vista de los nuevos retos que están apareciendo en física nuclear.

El progreso en la investigación teórica general depende de la mejora sustancial de instalaciones de cálculo de primera categoría. Los extensos cálculos en que se basan los complejos modelos que describen los experimentos actuales requieren de grandes memorias y de una gran rapidez de cálculo por parte de los computadores de clase VI. El acceso de los teóricos

nucleares a una fracción importante del tiempo disponible de un computador central de clase VI bien implementado podría, inicialmente, satisfacer estas necesidades.

Investigación y desarrollo de aceleradores

La investigación y desarrollo de aceleradores continúa siendo vital para el progreso de nuevas instalaciones avanzadas, por lo que deben ser apoyados de forma adecuada. Entre las nuevas tecnologías importantes que merecen este apoyo se encuentran los materiales superconductores destinados a diversas estructuras de los aceleradores (incluyendo los generadores del campo magnético principal), los preaceleradores cuadrupolares de radiofrecuencia para los iones de baja velocidad, los «refrigeradores» para reducir la dispersión energética de los haces de partículas aceleradas, los haces de núcleos radiactivos de vida corta con las intensidades adecuadas para los experimentos de física nuclear y astrofísica, y una gran variedad de avanzadas fuentes de iones.

Formación de nuevos científicos

La física nuclear es una de las ciencias más fundamentales. La aplicación de sus principios y técnicas son vitales para el conocimiento de áreas de interés nacional tales como las técnicas energéticas, defensa, salud, control ambiental y tecnología de materiales. Para satisfacer estas necesidades y continuar la exploración de los objetivos científicos básicos de la física nuclear es esencial la presencia de jóvenes científicos en las universidades.

La comisión está preocupada por la continua disminución del número de estudiantes que siguen cursos de doctorado de física, en general, y de física nuclear en particular. Esta disminución tiene varias causas cuyo remedio se encuentra, en gran medida, en el decidido apoyo a la enseñanza de la física nuclear —desde la licenciatura hasta el doctorado— por parte del gobierno del país en cuestión.

Isótopos estables enriquecidos

El Calutrón, instalado en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, es la fuente estadounidense más importante de isótopos estables, los cuales son utilizados tanto para la investigación científica como para la producción de los isótopos radiactivos necesarios para la investigación biomédica y la medicina clínica. Actualmente existen agudas deficiencias de isótopos estables, que, añadidas a una financiación claramente insuficiente, permiten prever un rápido deterioro del suministro.

El empeoramiento de este déficit tendría consecuencias desastrosas en muchas áreas de la investigación científica así como en la medicina clínica, donde los isótopos estables son herramientas indispensables. Por lo tanto, resulta prioritario renovar las reservas de isótopos separados antes de que se paralice una parte importante de la investigación nuclear. Para asegurar la solución del problema, deben continuarse las acciones correctivas, tanto por parte de las comunidades científicas afectadas como por parte de las agencias de financiación.

Recopilación de datos nucleares

Durante más de 40 años, los recopiladores y evaluadores de los avances en la ciencia han intentado mantener a los científicos informados con detalle de los datos nucleares que se iban adquiriendo. Sin embargo, las recopilaciones han empezado a quedar retrasadas debido a los rápidos avances experimentales de los últimos decenios. Debido a que los costes de este programa son relativamente pequeños, un modesto incremento de los fondos aumentaría enormemente la capacidad de mantenimiento del esfuerzo de recopilación/evaluación y aseguraría la puntual publicación de estos resultados en los diversos formatos requeridos por los físicos nucleares y por los usuarios de las aplicaciones de los isótopos radiactivos.

1. Introducción a la física nuclear

Todos los fenómenos del Universo surgen de la acción de sólo tres fuerzas fundamentales: la *gravitación*, la menos familiar *fuerza fuerte* y la *fuerza electrodébil*. El complejo juego de estas dos últimas fuerzas define la estructura de la materia y en ningún lugar son tan evidentes las millares de manifestaciones de este conjunto de fuerzas que en el núcleo atómico. La mayor parte de la materia del Universo se manifiesta en forma de núcleos ordenados de diferentes formas. Dentro de los núcleos corrientes, la débil atracción gravitatoria que ejercen entre sí las partículas que los constituyen está dominada por la incomparablemente más intensa fuerza nuclear. Sin embargo, en las estrellas de neutrones, que constituyen extraños objetos astrofísicos cuyas propiedades se parecen mucho a las de los núcleos gigantes, los efectos gravitatorios son muy grandes.

Los estudios del núcleo pueden ser considerados como la conexión entre el mundo infinitesimal y el astronómico. En general, los diferentes núcleos pueden ser comparados a un laboratorio para investigar las fuerzas fundamentales que han gobernado el Universo desde su origen en la gran explosión. En realidad, tal como ilustra el presente informe, el estudio de la física nuclear está cada vez más conectado con el de la cosmología y el de la física de partículas elementales.

Antes de iniciar el estudio del tema en cuestión, puede resultar útil revisar rápidamente el campo de la física nuclear a un nivel elemental con el objeto de aprender su lenguaje. Aunque la física nuclear tiene fama de ser un tema difícil, los conceptos básicos son relativamente cortos y sencillos.

EL NÚCLEO ATÓMICO

El núcleo atómico es un objeto extremadamente denso de forma esférica constituido por *protones* y *neutrones* empaquetados muy juntos (v. fig. 1-1). Los protones y neutrones reciben el nombre colectivo de *nucleones*, y durante muchos años se creyó que éstos eran verdaderas partículas elementales. No obstante, estas partículas no son elementales, ya que poseen una estructura interna formada por partículas más pequeñas además

de las existentes en el núcleo. (Estos aspectos del núcleo se detallan más adelante.) Los protones y los neutrones son muy similares ya que poseen propiedades físicas casi idénticas. Una diferencia importante, no obstante, se encuentra en su carga eléctrica: los protones tienen una carga positiva unidad, y los neutrones no poseen carga. Son tan similares, por otra parte, que su interconversión durante la desintegración del núcleo es un fenómeno común.

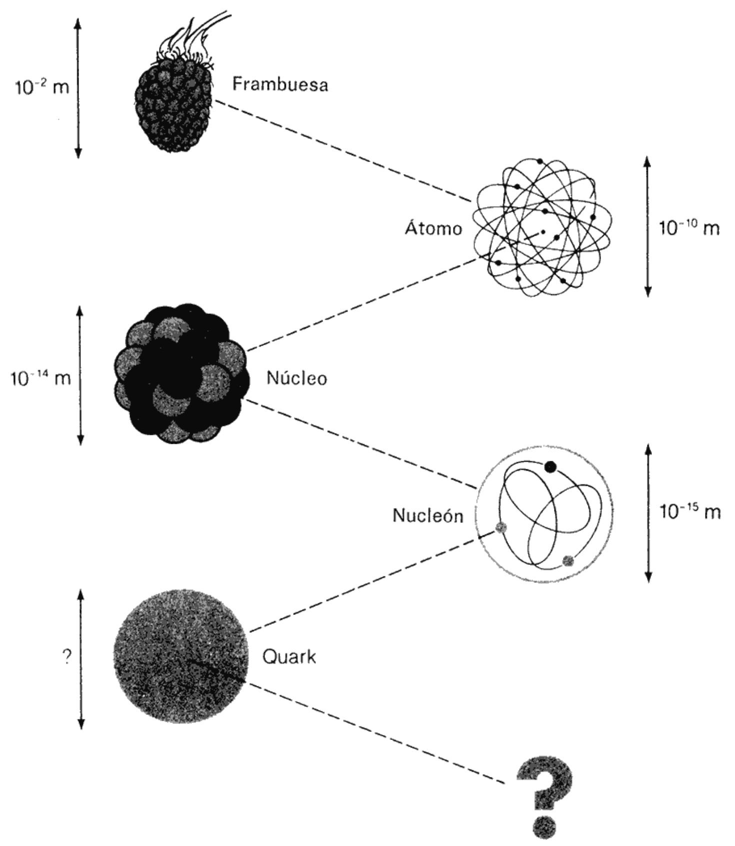


Fig. 1-1. Dimensiones aproximadas de diferentes estructuras de la materia, desde una frambuesa hasta los quarks (se han omitido los niveles celulares y moleculares).

El carácter del núcleo es el que proporciona la diversidad de los elementos químicos, de los cuales se conocen 109, incluyendo aquellos creados por el hombre. (El origen cósmico de los elementos es otro tema que se estudia en el campo especializado de la astrofísica nuclear.) Cada elemento tiene un *número de protones, Z,* único. Este define su identidad química, ya que el número de protones (igual al número de unidades de carga eléctrica presentes en el núcleo) está compensado, en un átomo neutro, por el número de electrones, y las propiedades químicas de cualquier elemento dependen exclusivamente de sus electrones orbitales. El átomo más ligero y pequeño, el de hidrógeno, tiene un protón y por lo tanto un electrón; el átomo mayor y más pesado que existe en la naturaleza, el de uranio, tiene 92 protones y 92 electrones.

Sin embargo, para explicar la *estabilidad* de los elementos y estudiar la física del núcleo, se debe tener en cuenta el *número de neutrones, N,* de cada núcleo, que puede variar considerablemente de un núcleo a otro de un mismo elemento. El núcleo del hidrógeno, por ejemplo, tiene un protón y *ningún* neutrón, lo cual constituye un caso único entre todos los núcleos. Por otro lado, un núcleo de hidrógeno también puede existir bajo la forma de un protón y un neutrón ($Z = 1$, $N = 1$), recibiendo el nombre de *deuterón,* y el átomo, con su electrón único, se denomina *deuterio.* No obstante, químicamente continúa siendo hidrógeno, al igual que la forma más pesada y radiactiva denominada *tritio,* la cual tiene un protón y dos neutrones ($Z = 1$, $N = 2$). El núcleo de tritio es el *tritón.*

Estos núcleos distintos de un único elemento químico, que difieren únicamente en el número de neutrones, reciben el nombre de *isótopos.* Cada elemento tiene por lo menos varios isótopos —estables e inestables (radiactivos)— e incluso algunos de los más pesados tienen más de 35. Aunque las propiedades químicas de los isótopos de un elemento dado son las mismas, sus propiedades nucleares pueden ser tan diferentes que es preciso identificar sin ambigüedades cada isótopo conocido o hipotético del elemento. La manera más sencilla de realizar este proceso consiste en utilizar el nombre del elemento y su *número músico, A,* el cual es simplemente la suma de su número de protones y neutrones: $A = Z + N$. Debido a que diferentes combinaciones de Z y N pueden dar el mismo valor de A, núcleos de diferentes elementos pueden tener el mismo número másico (cloro 37 y argón 37, por ejemplo). Para enfatizar la unicidad de cada tipo de

núcleo que puede ser identificado de forma separada, los científicos se refieren a ellos como *núclidos*.

Los elementos químicos poseen unos 300 núclidos estables y unos 2.400 *radiactivos* (es decir, que se desintegran espontáneamente). La mayor parte de estos últimos no existen en la naturaleza sino que han sido creados en los aceleradores de partículas o en los reactores nucleares. Estas máquinas de la física moderna también pueden crear condiciones experimentales que son drásticamente distintas de las que ordinariamente existen en la Tierra pero que, tal vez, son similares a las que existen en otros lugares menos hospitalarios del Universo. Por lo tanto, estas máquinas permiten extender el dominio intelectual del hombre a regiones que, de otro modo, serían inaccesibles.

El principal objetivo de la física nuclear es la investigación experimental y teórica del amplio abanico de núcleos existentes en los elementos químicos. En el estudio de la *espectroscopia nuclear*, por ejemplo, los físicos experimentales realizan muchos tipos de medidas cuya finalidad es caracterizar detalladamente el comportamiento de los núclidos y encontrar estructuras y simetrías que permitirán ordenar e interpretar, en términos de principios unificadores, enormes cantidades de información. Los físicos teóricos, por otra parte, buscan estos principios unificadores a través de cálculos basados en los datos existentes y en las leyes fundamentales de la naturaleza. Su intención es, no sólo explicar todos los hechos conocidos de la física nuclear, sino también predecir otros nuevos cuya verificación experimental confirmará la corrección de la teoría y extenderá los límites de su aplicabilidad.

Una aproximación similar se utiliza para estudiar las *reacciones nucleares*, en las cuales los físicos experimentales y teóricos tratan de comprender la naturaleza cambiante y los mecanismos de las colisiones entre proyectiles y blancos, así como las energías cada vez mayores proporcionadas por los aceleradores modernos. Las diversas maneras bajo las cuales los núcleos blancos pueden responder a las perturbaciones producidas por los energéticos haces de proyectiles proporcionan una rica fuente de datos experimentales, a partir de los cuales puede obtenerse una mejor comprensión de la estructura nuclear y de las leyes de la naturaleza. En los casos extremos, esto da lugar a nuevos estados de la materia nuclear.

EL PROBLEMA NUCLEAR DE MUCHOS CUERPOS

El fin último de la física nuclear es explicar el núcleo como un *sistema de muchos cuerpos cuyas partículas interaccionan fuertemente.* En física, tres o más cuerpos que interaccionan mutuamente —sean nucleones o estrellas— son considerados como «muchos» debido a las tremendas dificultades matemáticas que posee la resolución de las ecuaciones que describen sus movimientos. Puesto que cada objeto afecta el movimiento de todos los demás a través de las interacciones que existen entre ellos, el problema pronto adquiere proporciones enormes, ya que todas las interacciones cambian constantemente. De hecho, este *problema de muchos cuerpos* sólo puede resolverse mediante la utilización de grandes computadores, en el caso de tres cuerpos. Sin embargo, en el caso de cuatro o más, el problema general todavía no ha sido solucionado y en la práctica es preciso utilizar métodos basados en varias aproximaciones que simplifican las matemáticas utilizadas para resolver el proceso.

La intención de los físicos nucleares —dentro de las limitaciones impuestas por el problema de muchos cuerpos— es comprender, en primer lugar, la estructura de los núcleos en términos de sus partículas constituyentes, la dinámica de los núcleos en términos de los movimientos de estas partículas y, por último, las interacciones fundamentales entre las partículas que gobiernan estos movimientos. El estudio de estos conceptos se realiza, de forma experimental, a través de la espectroscopia nuclear y del análisis de los diversos tipos de reacciones nucleares, mientras que la teoría se lleva a cabo mediante la construcción de modelos matemáticos simplificados que solucionan el problema de muchos cuerpos.

Estos modelos nucleares son de diferentes tipos. Los *modelos de partículas independientes* permiten examinar el movimiento de un único nucleón en términos de un campo de fuerzas promedio estacionario producido por los demás nucleones. El modelo de partículas independientes mejor conocido es el *modelo en capas,* llamado así porque impone la construcción de «capas» de nucleones análogas a las de los electrones en la teoría de la estructura atómica. En el otro extremo, los *modelos colectivos* hacen referencia al movimiento de los nucleones de un núcleo de forma concertada (colectivamente) de manera simple o compleja —al igual que las moléculas de un fluido pueden moverse suavemente o turbulentamente.

De hecho, el modelo colectivo mejor conocido, el modelo de la gota líquida, *se basa en analogías con el comportamiento de una gota líquida.*

Las descripciones anteriores son, por necesidad, demasiado simples. Los modelos reales aquí señalados, al igual que otros parecidos, son muy sofisticados, y el éxito que han obtenido en la explicación de la mayor parte de los conceptos que se conocen acerca de la estructura nuclear y su dinámica es considerable. No obstante, se debe tener en cuenta las interacciones específicas nucleón- nucleón de forma cada vez más detallada, lo que da lugar a la aparición del objetivo esencial de la física nuclear: los nucleones como partículas que interaccionan fuertemente.

LAS FUERZAS FUNDAMENTALES

En la naturaleza, la denominada *fuerza fuerte* mantiene el núcleo atómico unido a pesar de la importante repulsión electrostática que ejercen entre sí los protones cargados positivamente. La distancia sobre la cual se ejerce la fuerza fuerte es, no obstante, extremadamente pequeña: unos 10^{-15} m, o 1 fentómetro (conocido comúnmente como 1 *fermi* [fm] en honor del físico nuclear Enrico Fermi). El tamaño de un nucleón es de un fermi, lo cual constituye una cantidad realmente pequeña. El tiempo requerido por la luz para atravesar esta distancia increíblemente corta es, a su vez, infinitesimal: sólo 3×10^{-24} segundos. Tal como se verá a continuación, el tiempo característico empleado por muchos fenómenos que tienen lugar en el núcleo no es mucho mayor que ése, es decir, se sitúa entre 10^{-23} y 10^{-22} segundos, lo que viajando a la velocidad de la luz, correspondería a una distancia comprendida entre 3 y 30 fm.

Éste es el dominio —incomprensiblemente remoto para nuestra experiencia cotidiana— de la fuerza fuerte que controla el núcleo. Los nucleones del interior del núcleo se atraen fuertemente entre sí mientras se mueven dentro de los confines del volumen nuclear. Sin embargo, si intentan acercarse demasiado entre sí, la fuerza fuerte se vuelve bruscamente positiva e impide que esto ocurra. Es como si cada nucleón poseyera un escudo impenetrable a su alrededor que impidiera cualquier contacto directo con otro nucleón. Por lo tanto, el comportamiento de la fuerza fuerte es tan complejo, que el análisis de las interacciones múltiples nucleón-nucleón

(el problema nuclear de muchos cuerpos) es terriblemente difícil de resolver.

La *gravitación*, una fuerza de largo alcance cuya intensidad intrínseca es sólo unas 10^{-38} veces la de la fuerza fuerte, se encuentra en el otro extremo de las fuerzas fundamentales. Puesto que la fuerza gravitatoria entre dos objetos depende de sus masas, y puesto que la masa de un nucleón es extremadamente pequeña (alrededor de 10^{-24} g), es imposible medir los efectos de la gravitación en los núcleos. No obstante, el Universo contiene tantos átomos en forma de objetos enormemente masivos (estrellas, quasares y galaxias), que la gravitación es la fuerza que gobierna su estructura y su evolución. Y puesto que la gravitación es extremadamente importante en las estrellas de neutrones, tal como se ha mencionado anteriormente, estos núcleos supermasivos resultan de gran interés para los astrofísicos nucleares.

Entre la gravitación y la fuerza fuerte, pero mucho más cerca de esta última debido a su intensidad intrínseca, se encuentra la *fuerza electrodébil*. Esta compleja fuerza se manifiesta de dos formas tan diferentes, que hasta finales de los años 60 se creyó que se trataba de dos fuerzas fundamentales distintas (del mismo modo que, hace un siglo, se creía que la electricidad y el magnetismo constituían dos fuerzas distintas en lugar de dos aspectos distintos de una misma fuerza, el *electromagnetismo*). Hoy día se sabe que la propia fuerza electromagnética es sólo una parte de la fuerza electrodébil y, por lo tanto, ya no se la considera por sí sola una fuerza fundamental de la naturaleza.

El electromagnetismo es la fuerza que existe entre dos objetos magnetizados o cargados eléctricamente. Al igual que la gravitación, su fuerza puede extenderse a grandes distancias, y su intensidad decrece rápidamente a medida que aumenta la distancia entre los objetos. Sin embargo, su intensidad inherente es relativamente grande, alrededor del 0,7% de la fuerza fuerte para separaciones de 1 fm. El electromagnetismo es la base de la luz y de todas las formas similares de la radiación (rayos X, ultravioletas, radiación infrarroja y ondas radio, por ejemplo). Todas estas radiaciones se propagan a través del espacio por medio de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y son absorbidas y emitidas por los objetos en forma de pequeños gránulos de energía denominados *fotones*. En algunos procesos radiactivos, cuando los núcleos pasan a un estado de menor energía, se emiten fotones extremadamente energéticos denominados *rayos gamma*.

Un fotón es considerado como la unidad fundamental de la radiación electromagnética: un *cuanto*. Esta teoría, considerada revolucionaria en su momento, yace en el corazón de la *mecánica cuántica*, es decir, de la teoría física que se encuentra en la base de todos los fenómenos que ocurren a nivel de moléculas, átomos, núcleos y partículas elementales.

La segunda manifestación de la fuerza electrodébil es la *fuerza débil*, la cual es responsable de la desintegración de muchos núclidos radiactivos y de muchas partículas inestables, así como de todas las interacciones en las que intervienen las partículas denominadas *neutrinos*, de las que se tratará más adelante. La fuerza débil es menos intensa en los núcleos que las fuerzas electromagnética y fuerte, pues sólo tiene $10{\sim}^{5}$ veces la intensidad de la última, pero todavía es extremadamente fuerte comparada con la gravitación. La distancia sobre la cual es efectiva es incluso más pequeña que la de la fuerza fuerte: unos 10^{-18} m, o 0,001 fm (aproximadamente 1/1.000 del diámetro de un nucleón). La fuerza débil actúa directamente sobre procesos que son relativamente lentos en la escala de tiempo nuclear, ya que emplean 10^{-10} segundos o más para actuar. Por pequeño que pueda parecer este tiempo, constituye alrededor de un billón de veces más que el tiempo requerido por los procesos gobernados por la fuerza fuerte.

La predicción en 1967 —y la subsiguiente confirmación experimental— que las fuerzas electromagnética y débil son simplemente dos aspectos de una fuerza electrodébil fue un triunfo de la física que permitió avanzar en la comprensión de las leyes de la naturaleza. Sin embargo, puesto que estas dos componentes de la fuerza aparecen de un modo tan diferente (sus similitudes esenciales sólo actúan sobre energías extremadamente elevadas, mucho más allá de las que son normales en la física nuclear convencional), es usual hablar de ellas por separado, al igual que con la electricidad y el magnetismo. Por lo tanto, todavía son descritas a menudo como si cada una de ellas fuera fundamental. A lo largo de este libro, las circunstancias decidirán la forma en que serán descritas, es decir, como electromagnéticas y débiles, o como electrodébiles. En lo que respecta al resto de este capítulo serán tratadas por separado.

Las fuerzas fundamentales se denominan a menudo *interacciones* fundamentales, debido a que las fuerzas sólo existen en virtud de las interacciones que ejercen las partículas entre sí. Estas interacciones, a su vez, se efectúan mediante el intercambio de *otras* partículas entre las interactuantes. Este fenómeno puede parecer un agujero sin salida, pero, por lo que se

conoce, se detiene en la región de las partículas elementales, de las que se va a hablar brevemente a continuación para conocer dónde se encuentran los fundamentos sobre los que se apoya la física nuclear.

LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

El estudio experimental de la física de las partículas elementales —también conocido impropiamente con el nombre de física de altas energías— empezó a divergir de la física nuclear alrededor de 1950, cuando el desarrollo de la tecnología de los aceleradores convirtió en relativamente fácil la búsqueda de otras partículas «elementales» más básicas distintas al protón y el neutrón. Actualmente se ha descubierto y caracterizado una enorme variedad de partículas subnucleares, algunas de las cuales son verdaderamente elementales pero no así la mayoría.

Junto con el descubrimiento de estas partículas se realizaron importantes avances teóricos, tales como la síntesis electrodébil mencionada ya anteriormente, y las teorías matemáticas que intentan clasificar y explicar la aparentemente arbitraria proliferación de partículas (varios centenares en la actualidad) que aparece a medida que las energías alcanzadas por los aceleradores son cada vez más altas. Debido a su gran poder y generalidad, las *teorías cuánticas de campos* se encuentran a la cabeza de las teorías de las interacciones fundamentales. Todas ellas son *relativistas*, es decir, incorporan la *relatividad* en el marco mecánico cuántico del problema que se trata, y, por lo tanto, representan el nivel de comprensión más profundo que se posee en la actualidad en torno a este tema.

Se volverá a hablar de estas teorías en siguientes capítulos, pero antes es necesario ver qué clases de partículas han surgido de este caos aparente por dos motivos. Primero, el núcleo, tal como es conocido actualmente, *no* está compuesto únicamente de protones y neutrones, los cuales, a su vez, no son partículas elementales. Por lo tanto, para comprender adecuadamente el núcleo atómico, se deben tener en cuenta todas las demás partículas que puedan existir en diferentes situaciones, así como su composición y la de los nucleones. Segundo, el marco teórico actual de buena parte de la física nuclear está profundamente enraizado en la teoría cuántica de los campos de las interacciones fundamentales, lo cual es objeto de estudio de la física de partículas. Tras una larga separación, algunos aspectos de

ambos campos empiezan a converger rápidamente, por lo que ya no es posible investigar muchos de los problemas fundamentales de la física nuclear fuera del contexto de la física de partículas. De hecho, buena parte del material que se ha utilizado en este libro hace referencia al modo en que se adquirió esta nueva perspectiva de la física nuclear así como de la forma de acelerarla en el futuro.

Actualmente, los físicos sostienen la teoría de que existen tres clases de partículas elementales *(leptones, quarks* y *bosones vectoriales elementales)* y que cada partícula, elemental o no, tiene su correspondiente antipartícula. Una antipartícula difiere de su partícula ordinaria en que algunas de sus propiedades elementales, tal como las cargas eléctricas, son opuestas. Por lo tanto, la antipartícula del electrón está cargada positivamente y se denomina *positrón;* los antinucleones son el *antiprotón,* cargado negativamente, mientras que el *antineutrón* es neutro. La antipartícula de una antipartícula es la partícula original y algunas de ellas, como el fotón, son consideradas como sus propias antipartículas. En general, cuando se encuentran una partícula y su correspondiente antipartícula pueden aniquilarse entre sí (desaparecer por completo) en una erupción de energía pura, de acuerdo con la fórmula de Einstein que expresa la *equivalencia entre la masa* y *la energía*, $E = mc^2$. Las antipartículas se observan y utilizan de forma rutinaria en muchos experimentos de física nuclear y de partículas. Por lo tanto, debe tenerse en cuenta que por cada partícula también existe su antipartícula.

Leptones

Los leptones son partículas que interactúan débilmente, es decir, experimentan la interacción débil pero no la fuerte y son considerados como entidades puntuales sin estructura. El más familiar de los leptones es el *electrón,* una partícula muy ligera (alrededor de 1/1.800 la masa de un nucleón) que posee carga negativa. Por lo que se sabe, el muon es idéntico al electrón excepto en que su masa es 200 veces mayor[1].

---

[1] El muon todavía recibe, ocasionalmente, el nombre de mesón mu (su nombre original), lo que puede llevar a confusión debido a que el término «mesón» está restringido actualmente a un tipo muy distinto de partículas. Así un «mesón mu» *no* es un mesón en sentido moderno.

La partícula tau, o *tauón*, es un leptón descubierto recientemente que también sería idéntico al electrón excepto por ser unas 3.500 veces más pesado (por lo que es casi dos veces más pesado que un nucleón). La simple existencia de estos «electrones pesados» y «electrones muy pesados» constituye un gran interrogante para los físicos.

Asociado con cada uno de estos tres leptones cargados existe un leptón denominado *neutrino*; por lo tanto, hay un neutrino electrónico, un neutrino muónico y un neutrino tauónico. Los electrones son eléctricamente neutros y por consiguiente no experimentan la interacción electromagnética. Se ha supuesto en términos genéricos que poseen masa en reposo cero, y por lo cual deben moverse a la velocidad de la luz, de acuerdo con la relatividad, pero la cuestión de su masa es un problema controvertido. En particular, si el neutrino electrónico posee masa, ésta debe ser muy pequeña. No obstante, la posibilidad de que posean masa tiene un gran significado cosmológico: debido a la existencia de *tantos* neutrinos en el Universo producidos durante la gran explosión, su masa conjunta podría ejercer un efecto gravitatorio lo suficientemente grande como para frenar e incluso detener la expansión actual del Universo.

Los neutrinos y antineutrinos se producen habitualmente en los procesos radiactivos denominados *desintegraciones beta* (un proceso de interacción débil). En ellos, el neutrón de un núcleo emite un electrón (a menudo denominado *partícula beta)* y un antineutrino, y se convierte en un protón durante el proceso. Por lo tanto, los neutrinos y antineutrinos juegan un papel importante en la física nuclear. Desgraciadamente, estos elementos son extremadamente difíciles de detectar, puesto que además de ser neutros, tienen la capacidad de atravesar inmensas cantidades de materia sólida sin detenerse.

Se ha hecho referencia a tres parejas, o familias, de leptones cargados y tres de neutros que interactúan débilmente; por lo tanto también existen seis antileptones. A continuación se hablará de los quarks, los cuales también forman tres parejas.

Quarks

Los quarks son partículas que presentan interacción fuerte y débil a la vez. Su existencia fue postulada en 1964 en un esfuerzo por poner orden

en el caos de partículas conocidas, pero la confirmación experimental de su existencia parece que llega lentamente. La dificultad es debida a que, aparentemente, no pueden existir como partículas libres en condiciones normales sino que sólo pueden existir como combinaciones ligadas de tres quarks, tres antiquarks, o una pareja quark-antiquark. Por lo tanto, aunque se cree que son verdaderas partículas elementales, sólo pueden ser estudiadas —hasta el momento— dentro de los confines de las partículas compuestas (las cuales, a su vez, se encuentran a menudo en el interior de un núcleo). Esta aparente incapacidad de los quarks de escapar, bajo condiciones ordinarias, de su estado de ligazón recibe el nombre de *confinamiento de los quarks.*

Hay seis tipos fundamentales de quarks, respectivamente, clasificados en tres parejas o familias; sus nombres son *up* (arriba) y *down* (abajo), *strange* (extraño) y *charm* (encanto), y *top* (cima) y *bottom* (final). Solamente falta por descubrir el quark «top», aunque en el verano de 1984 se encontraron los primeros indicios de su existencia. Las seis variedades enumeradas anteriormente son conocidas como los *sabores* de los quarks, y se cree que cada uno de estos sabores puede existir en forma de tres posibles estados denominados *colores.* (Ninguno de estos nombres está conectado con el significado habitual que poseen en la vida corriente. Todos ellos son caprichosos y arbitrarios.) El sabor es una propiedad similar que distingue a las tres familias de leptones (electrón, muon y tauón), mientras que el color es una propiedad más parecida a la carga eléctrica.

Otra propiedad extraña de los quarks es que poseen carga eléctrica fraccionaria; a diferencia de otras partículas que poseen un valor entero de la carga, los quarks poseen o bien –1/3 o bien +2/3. Puesto que jamás se han observado los quarks libres, estas cargas jamás han podido ser observadas, sino sólo inferidas. Estas partículas compuestas relativamente grandes son los *hadrones*, todos los cuales experimentan tanto la interacción fuerte como la débil. Aunque los quarks están cargados, no todos los hadrones lo están; algunos son neutros debido a que las cargas de los quarks se cancelan.

Existen dos clases distintas de hadrones: bariones y mesones. Los *bariones* —que representan con mucho la categoría más amplia de las partículas subnucleares— están formados por tres quarks ligados (los antibariones están formados por tres antiquarks) que se encuentran dentro de lo que se conoce como *bolsa.* Se trata simplemente de un modelo (no una

explicación real) para dar cuenta del fenómeno todavía inexplicado del confinamiento de los quarks. Se supone que los quarks están «atrapados» en la bolsa y que no pueden salir.

Así pues, los nucleones son bariones y están formados por quarks arriba (*u*) y abajo *(d).* Los protones tienen la estructura *uud,* y los neutrones la estructura *udd.* Los *hiperones,* partículas inestables cuya característica distintiva es la *extrañeza,* es decir, que todas contienen un quark extraño (s), forman una clase más amplia de bariones. Además, existen docenas de *resonancias bariónicas,* que son bariones masivos, extremadamente inestables, cuya vida media es tan corta (unos 10^{-23} segundos) que no pueden ser considerados como verdaderas partículas.

La otra clase de hadrones la constituyen los *mesones,* los cuales también forman varios bloques. Se trata de partículas inestables formadas por una pareja quark-antiquark, a las que también se puede aplicar el modelo de bolsa. Al igual que los bariones, todos los mesones experimentan interacciones fuertes y débiles, y los que están cargados también experimentan la interacción electromagnética. Los más comunes son los mesones pi *(piones*) y los mesones *K* (*kaones*); estos últimos son partículas extrañas.

Todos los hadrones están sujetos a la fuerza fuerte. Pero ésta, a su vez, es un simple vestigio de otra fuerza mucho más intensa que es la que gobierna la interacción de los quarks entre sí: se trata de la *fuerza de color*. Estas dos fuerzas son realmente la misma, pero con diferentes niveles de intensidad.

Las dos manifestaciones de la fuerza que mantienen a los núcleos unidos son muy importantes, ya que fundamentan dos niveles de comprensión de los fenómenos nucleares claramente distintos, que se encuentran más allá de la simple imagen formada por los nucleones como únicos constituyentes del núcleo. La fuerza fuerte está relacionada con la presencia de un gran número de mesones (especialmente piones) en el núcleo, y muchos conceptos de la física nuclear no pueden entenderse a menos que el núcleo se imagine formado por bariones y mesones. La fuerza de color, por otro lado, está relacionada con la presencia en el interior de bariones y mesones de unas partículas denominadas *gluones;* esto representa un punto de vista diferente y mucho más profundo de los fenómenos nucleares (aunque todavía no se comprende bien desde el punto de vista teórico ni desde el punto de vista experimental). Los gluones pertenecen a la tercera clase de

partículas elementales, bosones vectoriales elementales, la cual se examinará brevemente a continuación de una corta introducción al concepto de spin.

Además de su masa y de su carga, todas las partículas subatómicas (incluyendo los propios núcleos) poseen una cualidad intrínseca denominada *spin,* la cual se puede imaginar de forma simple en términos de un objeto que gire alrededor de un eje. Los valores que pueden poseer las partículas están *cuantizados,* es decir, restringidos a valores enteros (0, 1, 2, ...) o semienteros (1/2, 3/2, 5/2, ...) de una unidad básica de medida mecánico-cuántica. Todas las partículas que poseen spin entero reciben el nombre de *bosones,* y todas las que lo tienen semientero *fermiones.* Por lo tanto, todas las partículas, independientemente de cómo puedan denominarse, son también bosones o fermiones. Siguiendo la secuencia de partículas que se ha estudiado hasta ahora, se podría establecer la siguiente clasificación: todos los leptones son fermiones, todos los quarks son fermiones y todos los hadrones están divididos, es decir, todos los bariones son fermiones, pero todos los mesones son bosones. En un sentido amplio, los fermiones son los ladrillos que dan lugar a los núcleos y átomos, y los bosones son las partículas que transportan las interacciones fundamentales.

El significado de la clasificación fermión-bosón se basa en una ley mecánico-cuántica denominada *principio de exclusión de Pauli,* la cual es obedecida por los fermiones pero no por los bosones. El principio de exclusión establece que en cualquier sistema de partículas, tal como un núcleo, no pueden coexistir fermiones que tengan el mismo estado cuántico (es decir, no pueden tener valores idénticos de cada propiedad física). Esto significa que todos los protones y todos los neutrones en un núcleo deben encontrarse en estados cuánticos diferentes, lo que establece restricciones sobre el tipo de movimientos que son capaces de experimentar Sin embargo, estas restricciones no se aplican a los mesones debido a que son bosones. Esta situación tiene profundas consecuencias en el estudio de la física nuclear.

La mayoría de los bosones que se comentarán a continuación son partículas elementales —a diferencia de los mesones— y se denominan *bosones vectoriales* (debido a que poseen spin 1).

Bosones vectoriales elementales

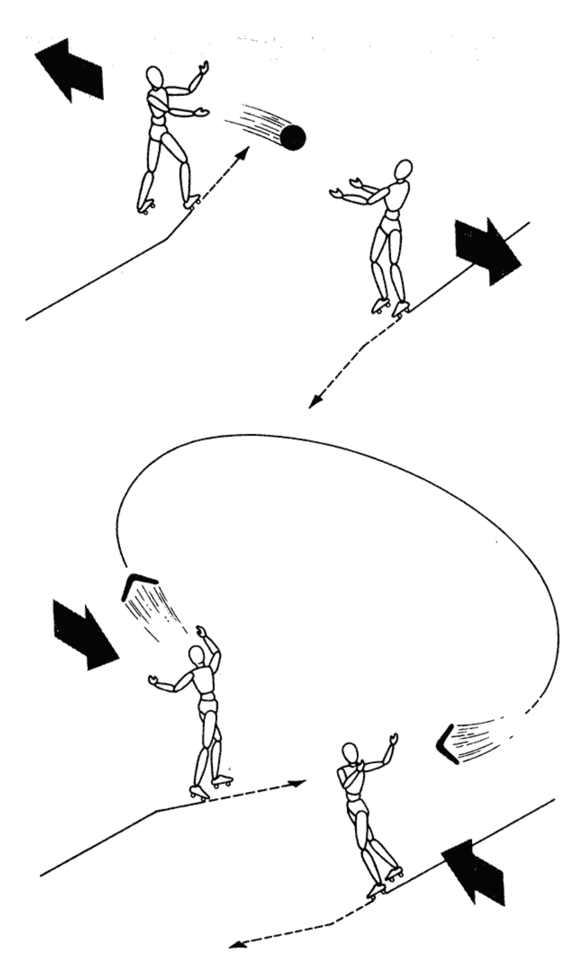
Anteriormente se ha comentado que las interacciones fundamentales se ejercían mediante el intercambio de determinadas partículas. Estas *partículas de intercambio* son los bosones vectoriales elementales (y mesones en algunos casos), cuya existencia fue predicha por la teoría cuántica de campos de la interacción correspondiente. Por ejemplo, la teoría de la interacción electromagnética, denominada *electrodinámica cuántica,* predice que el fotón es el vehículo que transporta la fuerza electromagnética. Un fotón que actúe como una partícula de intercambio es un ejemplo de *partícula virtual,* un término genérico que se utiliza para hacer referencia a aquellas partículas cuya efímera existencia sólo sirve para actuar de mediador de una fuerza entre dos partículas elementales, es decir, en cierto sentido, las partículas virtuales que viajan de una partícula material a otra *constituyen* la fuerza entre ellas (v. fig. 1-2).

Las partículas virtuales aparecen espontáneamente cerca de una de las partículas y desaparecen cerca de la otra. Se trata de un efecto puramente mecánico-cuántico que la naturaleza permite gracias al *principio de incertidumbre de Heisenberg*[2]. De acuerdo con este principio, una partícula virtual puede existir durante un intervalo de tiempo que es inversamente proporcional a la masa que tendría como partícula material. (Bajo ciertas condiciones, una partícula virtual puede convertirse en una partícula material.) La vida media de una partícula virtual determina la máxima distancia a la que puede viajar y, por lo tanto, el máximo alcance de la fuerza que transmite. Por consiguiente, cuanto mayor es la masa de la partícula material menor es la distancia a la que puede viajar como partícula virtual, y viceversa. Los fotones tienen masa cero, por lo que su alcance es infinito.

Fig. 1-2. La transmisión de fuerza entre partículas puede visualizarse (aproximadamente) si se observa a dos patinadores que juegan a intercambiarse objetos al pasar uno frente a otro. El lanzamiento y recogida de una pelota tiende a separar a los patinadores. Sin embargo, el uso de un boomerang tiende a acercarlos. (Según D. Wilkinson, en The Nature of Matter, J. H. Mulvey, ed. Oxford University Press, Oxford, 1981.) ►

---

[2] Estrictamente hablando, el principio de incertidumbre de Heisenberg establece la imposibilidad de medir simultáneamente y con una precisión arbitrariamente grande cantidades físicas tales como la posición y el momento de una partícula; sin embargo, la estructura de la mecánica cuántica conduce a una ley semejante para la energía y el tiempo.



Por contraste con la QED, la teoría de las interacciones débiles (en realidad la teoría electrodébil) predice la existencia de tres transportes diferentes de la fuerza débil, todos ellos extremadamente masivos, concretamente de 90 a 100 veces la masa del nucleón. Estas partículas elementales son bosones W^+, W^- y Z^0, denominados colectivamente *bosones vec-*

toriales intermediarios. Su descubrimiento en 1983 confirmó espectacularmente la validez de la teoría electrodébil. Debido a su gran masa, el principio de incertidumbre restringe de tal modo su vida media que no pueden viajar más allá de 10^{-18} m antes de desaparecer. Esto explica el alcance extremadamente corto de la fuerza débil.

La fuerza fuerte existe bajo dos formas, tal como se verá más adelante. La teoría cuántica de campos fundamental, denominada *cromodinámica cuántica* (QCD), predice la existencia de, por lo menos, ocho bosones vectoriales (los gluones) como mediadores de la fuerza de color entre los quarks. Se han obtenido indicios experimentales de la existencia de gluones, los cuales carecen de masa, al igual que los fotones, pero debido al confinamiento al que están sometidos los quarks, el alcance de la fuerza de color no va más allá de los confines de los hadrones (la bolsa de los quarks).

En su segunda forma, vestigial, la fuerza fuerte afecta a los hadrones (bariones y mesones) y es transmitida por los mesones o por piones cuando se trata de distancias largas. Este caso da lugar a un tipo de partícula, el mesón (que es un bosón, pero no una partícula de tipo elemental y no necesariamente de tipo vectorial), que puede actuar como su propia partícula de intercambio, es decir, los mesones materiales pueden actuar a través del intercambio de mesones virtuales. (Sin embargo, éste no es el único caso, pues los gluones, que poseen su propio color, también interactúan entre sí.) El alcance de la fuerza fuerte —muy corto, aunque mucho mayor que el de la fuerza débil— se explica gracias a la moderada masa de los mesones, la cual es claramente menor que la de un nucleón y mucho menor que la de un bosón vectorial intermediario. El dato más significativo para la física nuclear es que los nucleones interactúan a través del intercambio de mesones virtuales, por lo que se cree que el núcleo siempre contiene un enjambre de estas partículas entre sus nucleones.

Por lo tanto, la tradicional imagen de un núcleo formado únicamente por protones y neutrones ha sido sustituida por una más compleja en la cual las interacciones fuertes nucleón-nucleón deben pensarse en términos del efecto de *intercambio de mesones.* E incluso en este caso, se trata de una visión aproximada en comparación con el modelo mucho más complejo que puede obtenerse únicamente a partir de detalladas consideraciones acerca de la naturaleza *quark-gluon* de los propios mesones y nucleones. Por lo tanto, el núcleo debería explicarse en términos de un sistema

muy complejo de muchos cuerpos formados por quarks y gluones. El desafío teórico y experimental planteado por este objetivo es enorme, pero también lo es la potencial recompensa en términos de comprensión de la naturaleza de la materia nuclear.

LEYES DE CONSERVACIÓN Y SIMETRÍAS

Las cantidades totales de algunas magnitudes, tales como la carga eléctrica, parecen ser inmutables. Los físicos consideran que estas leyes se conservan, y expresan esta idea en forma de *leyes de conservación.* La ley de conservación de la carga, por ejemplo, establece que la carga total del Universo es constante, o, simplemente, que «la carga se conserva». Esto significa que en un objeto aislado ningún proceso puede provocar un cambio *neto* en su carga. Las cargas individuales pueden ser creadas o destruidas, pero la suma algebraica de tales cambios de carga debe ser cero, conservándose la carga original, cualquiera que pueda ser ésta.

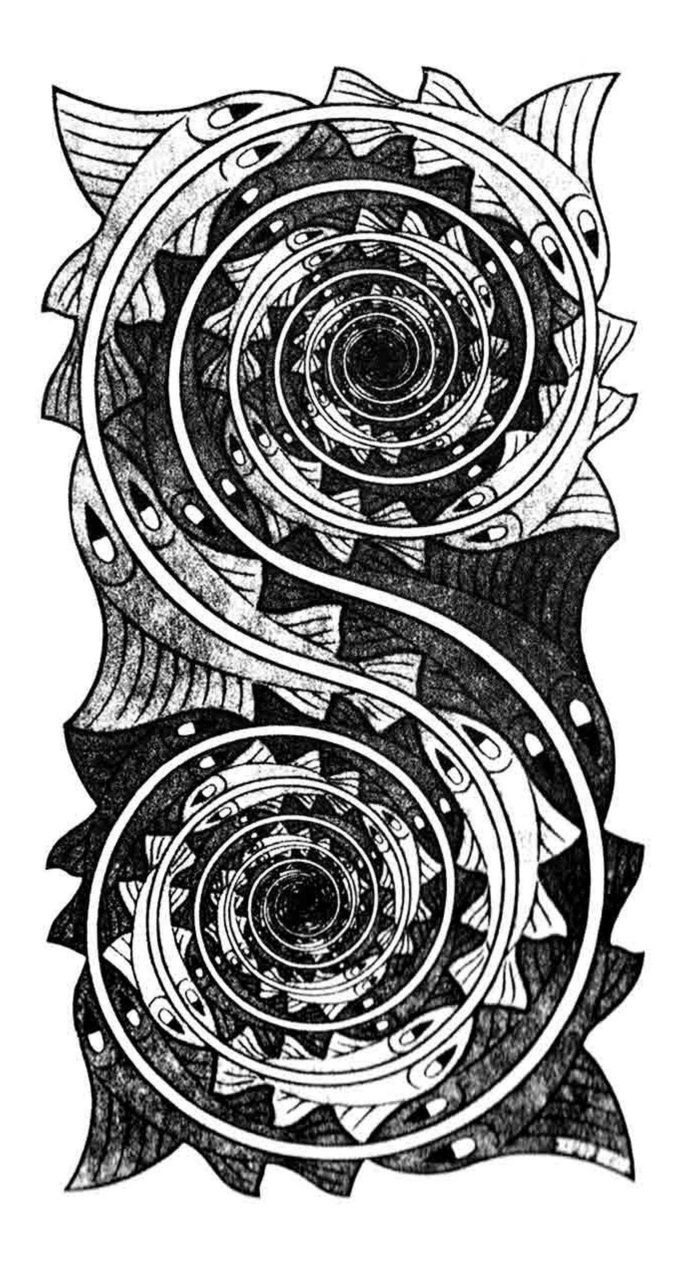
Otra cantidad importante que se conserva es la masa-energía. Antes de conocer las teorías elaboradas por Einstein, se creía que la masa y la energía siempre se conservaban por separado, pero ahora se sabe que esto no es estrictamente cierto ya que la masa y la energía son interconvertibles y, por lo tanto, es su *suma* la que se conserva. La masa, tanto en forma de partículas elementales como compuestas, puede ser creada a partir de energía pura, o puede ser destruida (aniquilada) para producir energía pura; ambos procesos son comunes en la física nuclear y de partículas. Este ejemplo ilustra la teoría de que aunque las magnitudes que se conservan cambien de forma, la ley de conservación no queda invalidada. La propia energía, por ejemplo, puede existir de muchas formas distintas —química, eléctrica, mecánica y nuclear, por ejemplo—, todas las cuales son interconvertibles de un modo u otro sin que se produzca ninguna ganancia o pérdida, con tal que se tengan en cuenta todos los efectos de conversión de masa y energía. De hecho, tales efectos sólo son significativos en los procesos subatómicos y constituyen la base de la física nuclear.

Otras dos cantidades que se conservan, el momento lineal y el momento angular, están relacionadas, respectivamente, con los movimientos lineales y circulares de un objeto. Las leyes de conservación de estas can-

tidades, junto a las mencionadas anteriormente, se aplican a todos los procesos, cualesquiera que sea el nivel estructural de la materia. Sin embargo, también existen leyes de conservación que sólo tienen sentido al nivel subatómico de núcleos y partículas. Una de tales leyes es la conservación del número bariónico, la cual establece que los bariones sólo pueden ser creados o destruidos en forma de parejas barión-antibarión. Todos los bariones tienen un número bariónico +1, y todos los antibariones tienen número bariónico –1; estos números se cancelan entre sí de la misma manera en que lo hacen las cargas eléctricas. Por lo tanto, un proceso de este tipo puede crear o destruir un cierto número de bariones, pero también debe crear o destruir el mismo número de antibariones, conservando, por lo tanto, el número bariónico. No existe ley de conservación para los mesones, por lo que, al igual que otros bosones, pueden proliferar sin tales restricciones.

Una ley de la naturaleza que predice qué procesos son permitidos y cuáles prohibidos —con virtual certeza y gran generalidad, y sin tener en cuenta el mecanismo detallado del proceso— representa una herramienta de valor incalculable en el esfuerzo de los físicos para comprender las sutilezas y complejidades del Universo. A menudo, las leyes de conservación son consideradas como las leyes más fundamentales de la naturaleza; sin embargo, al igual que el resto de las demás, su validez es tan buena como la de la experiencia sobre la que se apoyan. Basta demostrar la simple existencia de un ejemplo que viole la ley de conservación para invalidarla —por lo menos para esta clase de procesos— y minar su fundamento teórico.

La *simetría* de una forma física es un hecho tan habitual en todos los objetos que vemos a nuestro alrededor —y en nuestros propios cuerpos— que está considerada como un rasgo característico (aunque claramente no universal) del mundo natural. Un ejemplo de algunas simetrías geométricas puede verse en la figura 1-3. No obstante, por debajo de estas manifestaciones obvias de simetría existen leyes más profundas. Por ejemplo, la simetría fundamental del espacio y del tiempo respecto a movimientos lineales y de rotación de los objetos conduce directamente a las leyes de conservación de los momentos lineal y angular. De manera similar, los fundamentos matemáticos de las teorías cuánticas de campos implican determinadas simetrías de la naturaleza que se manifiestan en varias leyes de conservación en el dominio subatómico.



◄ **Fig. 1-3.** ***Remolinos,*** talla en madera de M. C. Escher que proporciona un ejemplo de complejas simetrías geométricas pertenecientes a la estructura nuclear. Las simetrías dinámicas que aparecen en las leyes físicas que gobiernan todos los fenómenos de la naturaleza son igualmente importantes. (Con el permiso de la Fundación Escher, Haags Gemeentemuseum, La Haya. Los derechos de reproducción han sido cedidos cortésmente por las Galerías Vorpal, Nueva York, San Francisco y Laguna Beach.)

Una de tales simetrías, denominada *paridad,* tiene que ver con el comportamiento que deberían tener las leyes físicas si cada partícula del sistema en cuestión se convirtiera en su imagen especular en las tres direcciones del espacio (es decir, si la derecha se cambiara por la izquierda, el frente por la espalda y arriba por abajo). La conservación de la paridad requerirá que cualquier tipo de experimento realizado con cualquier tipo de sistema debería producir resultados idénticos si se efectuara con el sistema simétrico descrito anteriormente. Durante muchos años se creyó que la paridad era una simetría exacta (universal) de la naturaleza, pero en 1956 los físicos nucleares y de partículas descubrieron que esto no era así sino que la paridad no se conserva en las interacciones débiles tales como la desintegración beta. No obstante, por lo que se conoce actualmente, la paridad se conserva en todas las demás interacciones fundamentales, y por lo tanto representa un principio que permite simplificar la construcción de teorías matemáticas de la naturaleza.

Un ejemplo similar de violación de simetría ha sido adaptado a un principio igualmente fundamental y útil denominado *invariancia frente a la inversión temporal,* el cual es análogo a la paridad excepto en el hecho de que contempla la imagen especular con respecto a la dirección del tiempo en lugar de la orientación de las partículas en el espacio. Se ha verificado que esta simetría es violada durante las desintegraciones de los kaones neutros. Todavía no se conocen otros ejemplos de fallo de la invariancia frente a la inversión temporal, pero los físicos están buscando cuidadosamente otros casos de este tipo con la esperanza de ganar una mejor comprensión de la razón que está detrás de este sorprendente fallo en una simetría perfecta de la naturaleza.

Las implicaciones de tales descubrimientos van mucho más allá de la física nuclear o de partículas, ya que están conectadas con cuestiones básicas de cosmología, tales como la forma de romperse de las simetrías primordiales que se cree han existido entre las interacciones fundamentales en el instante de la gran explosión, para dar lugar a las interacciones tan

diferentes que se conocen actualmente. Los esfuerzos de los físicos teóricos para construir las *teorías de gran unificación* de las interacciones fundamentales, las cuales son vistas simplemente como nuevas manifestaciones de una única fuerza unificadora de la naturaleza, dependen en gran medida de las observaciones experimentales referentes a las simetrías, leyes de conservación y sus violaciones.

A este respecto, uno de los datos más importantes lo constituiría cualquier evidencia de una violación de la conservación del número bariónico, la cual, después de todo, puede no ser una ley fundamental. Alguna de las teorías de gran unificación predicen, de hecho, que tal violación debería ocurrir en forma de una desintegración espontánea del protón, no en el sentido de una desintegración radiactiva beta, en la cual un protón se convierte en un neutrón (conservando por lo tanto el número bariónico), sino más bien a través de una súbita desaparición de un barión (el protón) como tal. Se han realizado, sin éxito por ahora, extensas investigaciones para detectar la desintegración de un protón.

También tendría importantes consecuencias cualquier violación de la conservación del número leptónico. Esta ley, que también es obedecida en la mayoría de los casos habituales, es análoga a la conservación del número bariónico, pero con un añadido: el número leptónico (+1 para leptones, –1 para antileptones) parece conservarse no sólo para cada clase de leptones sino también individualmente para cada una de las tres familias (el electrón, el muon y el tauon, con sus respectivos neutrinos). Cualquier violación de la conservación del número leptónico implicaría que los neutrinos no carecen, de hecho, de masa y que pueden *oscilar* (cambiar de una familia a otra) durante su viaje por el espacio. Éstas son las propiedades propuestas por algunas de las teorías de gran unificación, lo cual proporciona el ímpetu para buscarlas en varios tipos de procesos nucleares. Tales búsquedas de violaciones de leyes de conservación representan una importante frontera actual de la física nuclear así como de la física de partículas.

ACELERADORES Y DETECTORES

Las principales herramientas utilizadas en física nuclear son los *aceleradores*, complejas máquinas que actúan como potentes microscopios para sondear la estructura de la materia nuclear. Igualmente indispensables son

los *detectores* que registran y miden los diversos tipos de partículas y rayos gamma que surgen de las colisiones nucleares producidas por los aceleradores de haces.

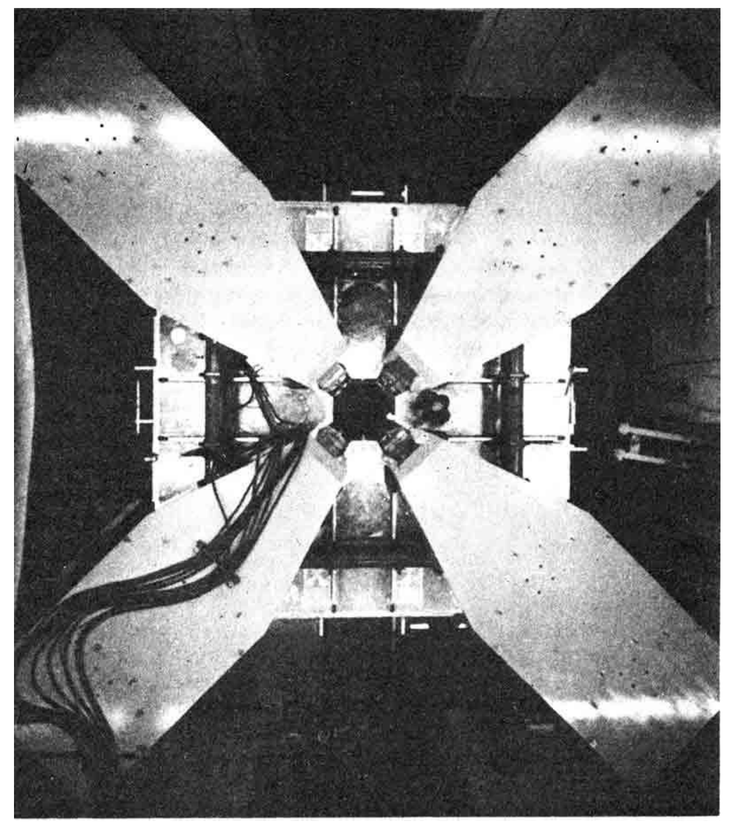


Fig. 1-4. Vista desde arriba del principal ciclotrón del «Indiana University Cyclotron Facility», un moderno acelerador utilizado para la investigación básica en física nuclear. El campo producido por los cuatro grandes imanes (obsérvese el físico situado entre dos de ellos) confina las partículas proyectil (iones ligeros hasta número másico 7) dentro de una serie de órbitas aproximadamente circulares cuyo tamaño crece a medida que son aceleradas hasta energías situadas en el rango de 40 a 210 M*e*V. Después de unas 300 órbitas, se extrae el haz y se dirige contra los blancos situados en las zonas experimentales vecinas. (Cortesía del «Indiana University Cyclotron Facility».)

Existen varios tipos de aceleradores, que difieren entre sí principalmente en la manera en que proporcionan energía a las partículas, según el rango de energías que abarquen y las trayectorias seguidas por las partículas aceleradas. Los tipos más corrientes son los aceleradores electrostáticos de Van de Graaff, los aceleradores lineales, ciclotrones y sincrotones; la figura 1-4 muestra un ejemplo de un moderno ciclotrón. En el capítulo 10 se incluye información adicional sobre los aceleradores en general, mientras que en el Apéndice A se ha incluido un esbozo general de los aceleradores más importantes que se utilizan en Estados Unidos.

Proyectiles y blancos

El principio básico de los aceleradores es el mismo en todos los casos: un haz de *proyectiles* eléctricamente cargados recibe un cierto número de pulsos de energía —en forma de campo eléctrico o electromagnético— para elevar la velocidad de las partículas (y por lo tanto la energía cinética) hasta un cierto valor deseado antes de que colisionen con un *blanco* específico. Los proyectiles típicos son los electrones, protones o núcleos. Estos últimos son denominados a menudo *iones*, debido a que no son generalmente núcleos desnudos, es decir, que todavía retienen uno o más electrones orbitales del átomo del cual procedían. Los núcleos de los dos elementos más ligeros, hidrógeno y helio, se denominan *iones ligeros* e incluyen la tan utilizada partícula alfa, que es simplemente un núcleo de helio-4 ($Z = 2$, $N = 2$). Los núcleos situados entre el litio ($A = 6$ o 7) y entre aquellos que tienen masa atómica alrededor de 40 reciben el nombre de *iones medios*, y aquellos cuyo número másico va desde 40 hasta el resto de la tabla periódica reciben el nombre de *iones pesados*. (Esta clasificación es útil, pero es necesariamente arbitraria ya que la definición de ion pesado, por ejemplo, se extiende a veces hasta el litio.)

Los aceleradores también pueden producir haces de proyectiles cargados exóticos o inestables tales como muones, mesones, antiprotones y núcleos radiactivos. Estos proyectiles se producen mediante reacciones que tienen lugar en el blanco de un haz primario y entonces son enfocados hacia un haz secundario. Incluso las partículas neutras, tales como neutrones y neutrinos, pueden ser producidas y utilizadas como haces secundarios.

En un típico experimento de física nuclear, el blanco que recibe el impacto del proyectil acelerado suele ser un pequeño pedazo de un elemento químico de particular interés, aunque también pueden utilizarse blancos líquidos o gaseosos. El objetivo puede consistir en utilizar los proyectiles para llevar el blanco desde su *estado fundamental de* mínima energía hasta *estados excitados* de mayor energía con el objetivo de obtener resultados acerca de las estructuras y dinámica de los núcleos intactos; en este caso se está realizando espectroscopia nuclear. Alternativamente, el objetivo puede consistir en bombardear el núcleo blanco, de tal modo que llegue a producirse algún tipo de reacción nuclear, desintegrándose posiblemente durante el proceso.

Las descripciones anteriores forman parte de las tradicionales máquinas de *blanco fijo* (un blanco estacionario que es bombardeado por un haz de proyectiles), pero los aceleradores también pueden construir máquinas que producen la *colisión entre haces* o *colisionadores*. En ellas, dos haces colisionan violentamente entre sí, generalmente de frente, en la zona de reacción donde los haces se cortan. Los colisionadores fueron introducidos por los físicos de partículas elementales debido a las enormes cantidades de energía que pueden depositar en la zona de colisión cuando ambos haces han sido acelerados a altas velocidades. Por esta razón, su uso se está volviendo cada vez más esencial para los físicos nucleares, tal como se describe en el capítulo 7.

Energías

Las energías cinéticas a las cuales son aceleradas las partículas o núcleos se expresan en términos de grandes múltiplos de una unidad denominada *electronvoltio* (*e*V), el cual es la cantidad de energía adquirida por un electrón (o cualquier otra partícula de carga unidad, como el protón) cuando es acelerado a través de una diferencia de potencial de un volt (V), como ocurre en una batería de 1 V. Las energías características de las partículas de un haz producido por los modernos aceleradores es del orden del megaelectronvoltio (1 M*e*V = 10^6 *e*V) y del gigaelectronvoltio (1 G*e*V=10^9 *e*V). Cuando se trata de núcleos acelerados, que contienen más de un nucleón, se acostumbra dar la energía por nucleón en lugar de la energía total del núcleo.

Debido únicamente a razones de conveniencia, tanto la energía de las partículas como sus masas se acostumbra expresar en electrón-volt. Cualquier masa puede expresarse en términos de una energía equivalente de acuerdo con la fórmula $E = mc^2$. Por lo tanto, la masa de un electrón es 0, 511 M*e*V, y la masa de un protón 938 M*e*V. Estas son las *masas en reposo* de estas partículas, es decir, las masas que tienen cuando no se mueven respecto a un sistema de referencia determinado (tal como el laboratorio). Sin embargo, cuando se mueven, su energía cinética es equivalente a una masa adicional. Este efecto sólo es significativo cuando su velocidad está muy cerca a la velocidad de la luz, ya que entonces su energía cinética se hace comparable o mayor que su masa en reposo. En ese caso, reciben el nombre de partículas *relativistas* (o núcleos), porque la dinámica de sus reacciones no puede ser descrita con precisión sin tener en cuenta la teoría de la relatividad.

Es conveniente clasificar los procesos nucleares en términos de diferentes regímenes energéticos de los proyectiles, aunque una clasificación de este tipo, al igual que la de las masas de los proyectiles, es algo arbitraria y carece de aceptación universal. El bombardeo con energías menores que 10 M*e*V por nucleón, por ejemplo, produce una gran variedad de fenómenos de *baja energía.* A lo largo de este proceso (alrededor de los 5 M*e*V por nucleón) los efectos debidos a la *barrera de Coulomb* son particularmente importantes, ya que la barrera de Coulomb es una manifestación de la fuerza repulsiva electrostática entre los núcleos blanco cargados positivamente y cualquier proyectil que posea el mismo tipo de carga. Para que se produzca una colisión en la que esté implicada la interacción fuerte, es necesario que el proyectil tenga la energía suficiente para vencer la barrera de Coulomb y pueda entonces acercarse suficientemente al blanco.

El régimen de *energía media* se encuentra entre 10 y 100 M*e*V por nucleón y en él se llevan a cabo muchos estudios de espectroscopia y reacciones nucleares, puesto que éstas son las energías características de los nucleones en el interior de los núcleos. En el régimen de *alta energía*, entre 100 M*e*V y 1 G*e*V por nucleón, los núcleos que interactúan alcanzan altas temperaturas; además, una parte de la energía de la colisión se convierte en masa, normalmente en forma de piones, que poseen una masa en reposo de 140 M*e*V. Por encima de 1 G*e*V por nucleón empieza el régimen *relativista,* donde se exploran condiciones extremas de la materia nuclear, tales como la formación de estados exóticos. [Es conveniente mencionar aquí

que para los electrones, la transición al régimen relativista se produce a densidades mucho más bajas (unos 0,5 M*e*V), debido a la menor masa en reposo.]

Interacciones nucleares

Los principales tipos de interacciones nucleares que se producen durante las colisiones son la *difusión (scattering),* en la cual el proyectil y el núcleo blanco no cambian excepto en lo que se refiere a sus estados energéticos; la *transferencia,* en la cual los nucleones pasan de un núcleo a otro; la *fusión,* en la cual dos núcleos se juntan para formar un núcleo compuesto; el *astillado (spallation),* en el cual algunos nucleones o grupos de nucleones son arrancados del núcleo, y la *desintegración,* en la que uno o ambos núcleos se rompen completamente.

No todas las interacciones que tienen lugar en las colisiones son igualmente probables, por lo que es importante conocer cuáles ocurrirán con una frecuencia considerable y cuáles no, y por qué. La probabilidad de que ocurra una interacción dada se expresa mediante una cantidad denominada *sección eficaz,* la cual puede medirse experimentalmente y ser comparada con las predicciones teóricas.

Otra cantidad cuya medida experimental es importante es la *vida media* de las especies radiactivas, es decir, el tiempo que emplea la mitad de los núcleos de una muestra en desintegrarse. Normalmente, esta desintegración se produce debido a una emisión de una partícula alfa, beta o un rayo gamma, o, menos frecuentemente, por *fisión espontánea,* en la cual un núcleo se divide en dos, emitiendo uno o más neutrones. Después de la desintegración de la mitad de los núcleos, se necesitará la *misma* cantidad de tiempo para que los núcleos restantes se reduzcan a la mitad y así sucesivamente. Las vidas medias características de los núclidos radiactivos varían dentro de un rango enorme de valores: desde una pequeña fracción de segundo a miles de millones de años.

Detectores de partículas

Los aceleradores no tendrían ninguna utilidad si no hubiera manera de registrar y medir las partículas y rayos gamma que se producen en las interacciones nucleares. Los detectores que se han inventado con este propósito son brillantes estructuras formadas por ingeniosos aparatos, muchos de los cuales han empujado la alta tecnología hacia nuevos límites. Algunos han sido diseñados para detectar únicamente partículas específicas cuya presencia puede constituir la *firma* de un particular fenómeno en el experimento en cuestión. Pueden diseñarse para detectar esta partícula únicamente dentro de un limitado espectro de ángulos de emisión con respecto a la emisión del haz o sobre todos los ángulos posibles.

Otros detectores han sido diseñados para detectar simultáneamente tantas clases de partículas como sea posible, ya sea para un cierto número de ángulos o para todos. Este tipo de detectores es necesariamente complejo debido a los muchos tipos de partículas que pueden observarse y al número de partículas que realmente se producen. Este último número, llamado *multiplicidad*, es del orden de uno o dos en muchos fenómenos, pero en las colisiones catastróficas de iones relativistas, puede elevarse a varios centenares. Además, otra consideración que debe tenerse en cuenta, en el diseño de los detectores, es si van a utilizarse en un acelerador de blanco fijo o en un colisionador, ya que muy a menudo los requisitos son distintos.

Entre los detectores más sencillos se encuentran aquellos en los cuales el paso de una partícula deja huella visible en un medio determinado. Ejemplos de tales detectores son la cámara de vapor (en la cual el medio es un gas), la cámara de burbujas (líquido), y emulsiones fotográficas (sólido). Muchos detectores, sin embargo, se basan en medios indirectos para registrar las partículas, cuyas propiedades pueden ser deducidas a partir de los datos. Los principios operativos de la gran mayoría de estos detectores están basados en las interacciones de partículas cargadas con campos magnéticos externos o en los fenómenos de ionización que resultan de sus interacciones con los materiales y los propios detectores. Los mayores de estos sistemas de detección pueden estar formados por millares de módulos individuales y se utilizan en el estudio de fenómenos muy complejos. Se requieren sofisticados computadores especializados para ordenar y guardar la gran cantidad de datos que proceden de tales instrumentos.

Los aceleradores más grandes requieren el esfuerzo de muchos físicos, ingenieros y técnicos durante muchos meses para planear y ejecutar un experimento importante, así como más meses de esfuerzo intensivo para analizar los datos e interpretar su significado. Este es el aspecto de «gran ciencia» que posee la investigación en física nuclear. No obstante, un rasgo muy notable de la física nuclear se basa en que una parte muy importante de la investigación todavía la llevan a cabo individuos o pequeños grupos que trabajan con instalaciones modestas, pero no anticuadas, en muchas universidades y laboratorios de todo el mundo. Es el esfuerzo acumulado de estos científicos y de sus colegas que trabajan en los aceleradores —junto con el de los físicos nucleares teóricos— el que logra el avance en los conocimientos de la física nuclear.

PRIMERA PARTE

AVANCES MÁS IMPORTANTES EN FÍSICA NUCLEAR

2. Estructura y dinámica nucleares

La era moderna de la física nuclear empezó con el sorprendente descubrimiento de que, a pesar de las enormes fuerzas presentes en el núcleo, los nucleones pueden ser tratados como si se movieran independientemente en un único campo de fuerza que varía suavemente. Ésta es la base conceptual del *modelo en capas,* el cual fundamenta buena parte del conocimiento cuantitativo de los niveles energéticos del núcleo y de sus propiedades. En este modelo, se considera que los nucleones individuales llenan los estados energéticos de forma sucesiva dando lugar a una serie de capas nucleares similares a las formadas por los electrones en el átomo.

En el nivel más simple, el modelo de capas predice, y de hecho se observa, que los núcleos que tengan capas de protones o neutrones completamente ocupadas deberían ser más estables. (El análogo químico lo constituyen los gases nobles, en los cuales todos los electrones están situados en capas cerradas.) Si un núcleo tiene un nucleón situado más allá de las capas completas, se le pueden atribuir muchas de las propiedades del núcleo, del mismo modo que la química del sodio puede explicarse ampliamente en términos de un único electrón de valencia.

El modelo en capa ha sido perfeccionado de modo que permita la incorporación de las fuerzas residuales entre nucleones que no están incluidas en el campo suave. Este proceso ha dado lugar a una valiosa herramienta que permite comprender y predecir muchos de los niveles energéticos y sus propiedades, tales como las interacciones electromagnéticas y sus ritmos de desintegración. Sin embargo, el modelo en capas con interacciones puede ser muy difícil o imposible de calcular, dependiendo del número de nucleones y del número de capas en los que éstos se mueven.

Debido a estas circunstancias, o en el momento en que es necesaria una descripción más simple, otros modelos han experimentado un éxito considerable. El *modelo de la gota líquida* describe al núcleo como si fuera una gota de un líquido que tuviera propiedades tan familiares como presión y tensión superficial. Este modelo ha sido útil en la sistematización de los datos sobre energías de ligadura y en el momento de proporcionar útiles imágenes cualitativas de las vibraciones y del proceso de fisión nuclear. Una característica importante del modelo de gota líquida lo constituye el

movimiento colectivo de muchas partículas, lo cual se observa a menudo en las propiedades de los niveles nucleares.

Otro modelo sencillo es el *modelo de los bosones interactivos*, que supone que los nucleones de varias capas se combinan para formar agrupaciones con un número par de nucleones (los cuales tienen spin entero y pueden ser considerados como bosones) que pueden ser estudiados mediante la aplicación de principios de simetría. En muchos casos, es posible conectar estos modelos con los modelos en capas más básicos pero, a su vez, más complicados.

Los experimentos en este campo estudian la estructura nuclear determinando qué estados energéticos aparecen en un núcleo dado y cuáles juegan un papel en cada reacción nuclear. En un principio, los experimentos estaban restringidos a los estados involucrados en la desintegración de los núcleos radiactivos naturales o a las pocas reacciones de baja energía que podían efectuarse con partículas alfa emitidas por minerales radiactivos. El advenimiento de los aceleradores incrementó enormemente el número de estados nucleares que podían ser excitados gracias al mayor número de tipos de proyectiles que poseían un amplio espectro de energía fácilmente controlable con precisión. Electrones, protones, iones ligeros y pesados, pueden ser acelerados sólo actuando sobre la carga eléctrica del proyectil. Además, pueden obtenerse haces secundarios de proyectiles neutros (sin carga) —fotones y neutrones, por ejemplo— a través de reacciones primarias, una técnica que también puede proporcionar proyectiles exóticos tales como piones o incluso neutrinos. De hecho, los haces intensos de piones se han convertido en una herramienta habitual de la investigación nuclear.

Una gran cantidad de estados nucleares se han vuelto accesibles, en parte, gracias a que el número de estados excitados se eleva al aumentar la energía por encima del estado fundamental, y en parte a que las interacciones con diferentes proyectiles provocan la excitación de diferentes tipos de movimientos nucleares internos.

Por ejemplo, los proyectiles formados por iones pesados de gran carga pueden ejercer potentes fuerzas de Coulomb (eléctricas) sobre los protones del núcleo blanco (un proceso denominado *excitación culombiana)* y permanecer fuera del alcance de las fuerzas nucleares. Por lo tanto, los efectos de las excitaciones culombianas pueden ser estudiados sin que interfieran en el proceso unas interacciones nucleares que resultarían perjudiciales.

La capacidad para excitar selectivamente ciertos tipos de movimiento nuclear se ha convertido en una herramienta muy importante en los estudios sobre estructura nuclear. Las siguientes páginas exponen algunos modos de excitaciones de interés habitual, así como los tipos de información que pueden proporcionar sobre la estructura y dinámica nucleares.

MODOS ELEMENTALES DE EXCITACIÓN

Los casos extremos, en los que un tipo de comportamiento predomina sobre todos sus competidores, suelen ser los más fáciles de tratar en el campo de la física. Por lo tanto, los físicos nucleares han centrado mucho su atención sobre estados excitados que corresponden o bien al modelo en capas, en un extremo, o bien al modelo de la gota líquida. En el primer caso, la excitación está diseñada para alterar el movimiento de un solo nucleón mientras el resto permanece prácticamente inalterado, de manera que los estados excitados que se produzcan puedan ser relacionados con el movimiento de un solo nucleón. En el segundo caso, la excitación requiere que todos los nucleones «olviden» sus movimientos individuales y participen en un movimiento global coherente, de manera similar a la de un banco de peces que, al ser espantados, se dirigen en conjunto hacia la misma dirección. Ambos modos de excitación pueden ser tratados de forma experimental y teórica, proporcionando imágenes únicas sobre el comportamiento de un sistema nuclear de muchos cuerpos.

Los movimientos colectivos de los núcleos incluyen rotaciones y vibraciones internas. Las rotaciones colectivas solamente se producen en núcleos deformados, no esféricos, y se deben al giro de algunos nucleones alrededor de las regiones internas en situación de reposo. Las vibraciones colectivas pueden tener lugar en cualquier núcleo y se parecen a los complejos movimientos de un balón lleno de agua al ser sacudido.

Sin embargo, el movimiento de los nucleones en el espacio de tres dimensiones no representa la única manera de dar lugar a modos colectivos. Las direcciones del spin de varios nucleones pueden oscilar hacia atrás y hacia delante de forma concertada después de una excitación. Debido a que el campo magnético del nucleón es paralelo al eje de su spin (análogamente al alineamiento del campo magnético de la Tierra con su eje polar), el cambio colectivo de spin proporciona una oscilación del spin del

núcleo y, por lo tanto, del campo magnético. En un modo colectivo similar, denominado *resonancia de Gamow-Teller*, la excitación afecta al *isospín* (provocando la conversión de un protón en un neutrón o viceversa), así como al spin. Recientemente, estos cambios de spin e isospín han sido observados sin ambigüedades en núcleos reales, tal como se verá más adelante, en este capítulo. Estos modos establecen una nueva categoría de estados excitados que aporta cierta luz sobre la manera en que se ve afectada la interacción entre dos nucleones por la presencia de sus vecinos. El descubrimiento de estos modos ha estimulado el desarrollo de la teoría de la estructura nuclear.

Resonancias eléctricas gigantes

A finales de los años 40, los físicos que estudiaban las reacciones emisoras de neutrones debido al bombardeo de núcleos mediante rayos gamma se sobresaltaron al descubrir *una resonancia* en la curva de la sección eficaz de la reacción (probabilidad de una reacción) cuando ésta se medía sobre un amplio rango de energías de los rayos gamma. Este pico dibujado en la curva presentaba un valor de 50 a 100 veces mayor que el de las secciones eficaces a energías vecinas, lo que constituía una resonancia realmente gigante. No obstante, se descubrió que la energía de los rayos gamma correspondiente al pico disminuía sistemáticamente al aumentar el número másico, que oscilaba desde 23 M*e*V en el carbono hasta 14 M*e*V en el plomo.

La resonancia gigante es una característica general de un sistema nuclear de muchos cuerpos y no depende de la estructura detallada de un núclido. Actualmente se la identifica como una vibración *dipolar eléctrica* causada por un movimiento colectivo en el núcleo: el campo eléctrico oscilante asociado con el rayo gamma induce la oscilación de los protones en el núcleo. Los neutrones, al no estar cargados, no reaccionan al campo eléctrico, de manera que aparece una vibración en la cual el centro de la carga eléctrica (debida a los protones) oscila con respecto al centro de masas, tal como se muestra de forma esquemática en la fig. 2-1. Clásicamente, este tipo de oscilación lineal de la carga se describe como la oscilación de un dipolo eléctrico, de donde proviene el nombre del fenómeno. El pico en la curva de la sección eficaz se debe a una resonancia amplificadora

entre la frecuencia de oscilación del campo eléctrico del rayo gamma y la frecuencia natural de oscilación del dipolo en el núcleo blanco.

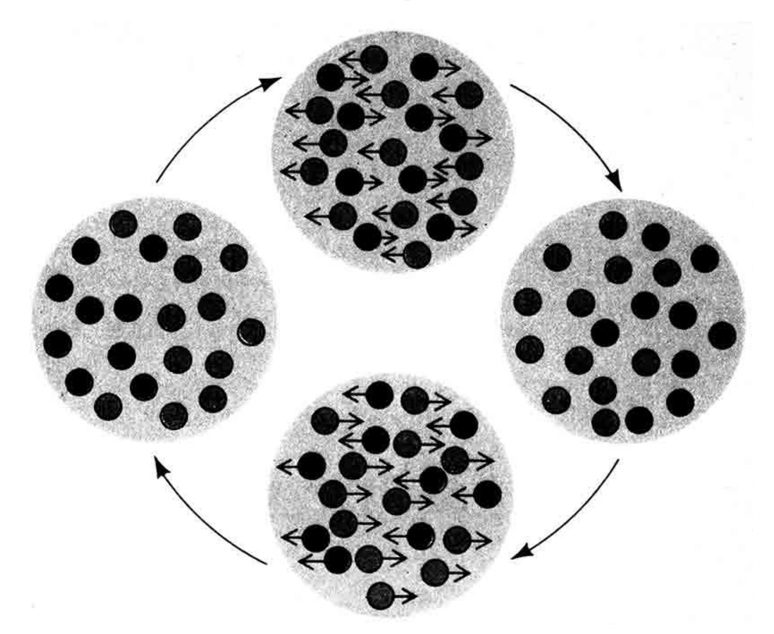


Fig. 2-1. Las vibraciones dipolares gigantes tal como se describen en el texto. Los movimientos relativos de los protones (círculos oscuros) y neutrones (círculos claros) durante las fases intermedias de la vibración están indicados mediante flechas. (Según G. F. Bertsch, Scientific American, mayo 1983, pág. 62.)

El grado máximo de probabilidad posible de que un núcleo absorba un rayo gamma puede calcularse a partir de consideraciones muy generales y se expresa a través de la *regla de la suma*, teoría que implica una suma sobre todas las cargas nucleares y las masas. La probabilidad observada de absorción de rayos gamma a las energías de resonancia es aproximadamente igual al máximo teórico obtenido mediante la regla de la suma aplicada a las oscilaciones del dipolo eléctrico —una fuerte evidencia de que esencialmente todos los protones intervienen en el movimiento colectivo.

El pico de resonancia dipolar magnética se extiende sobre una anchura de 3 a 7 M*e*V de energía, dependiendo del núcleo. Esto representa un pico

relativamente ancho, y los picos anchos corresponden generalmente a vidas cortas. Se estima que la oscilación dipolar eléctrica sólo efectúa unos pocos ciclos completos antes de disiparse, lo que corresponde a una vida media de unos 10^{-21} segundos.

Durante unos 25 años, las resonancias dipolares eléctricas constituyeron el único modo de vibración conocido. Tal como se deduce de la descripción anterior, los rayos gamma sólo resultan eficaces para excitar las vibraciones dipolares, ya que las vibraciones que corresponden a estructuras más complejas (multipolares) se estudian mejor a través de otros medios de excitación. Por lo tanto, los físicos experimentales estudiaron la difusión inelástica de partículas cargadas por núcleos, en las cuales el proyectil conserva su identidad pero deposita parte de su energía en el blanco. A principios de los años 70, un grupo de Darmstadt, Alemania Occidental, que utilizaba la difusión inelástica de electrones, y un grupo del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, que utilizaba la difusión inelástica de protones, encontraron claras evidencias de una resonancia dieléctrica *cuadrupolar*. En este caso, los protones y los neutrones se mueven conjuntamente en una vibración cuadrupolar, en la cual el centro de masas y cargas no se mueven, pero las distribuciones de carga y masa cambian rítmicamente a medida que el núcleo oscila entre una forma prolata (similar a balón de rugby) y una forma oblata (como una lenteja).

Posteriormente se advirtió que la difusión inelástica de partículas alfa era particularmente eficaz para excitar las vibraciones cuadrupolares gigantes. Esta técnica proporciona una herramienta particularmente manejable debido a que los haces de partículas alfa de 100 a 150 M*e*V pueden obtenerse en los ciclotrones y a que los haces difundidos de partículas alfa son fáciles de detectar. El uso de las excitaciones generadas por partículas alfa ha permitido establecer la energía del pico, su anchura, su altura, y algunos modos de desintegración de las resonancias cuadrupolares gigantes para un amplio espectro de núcleos. La resonancia tiende a aparecer alrededor de 10 a 20 M*e*V por encima del estado fundamental y tiene una anchura de 2 a 8 M*e*V, dependiendo del núcleo en cuestión. La regla de la suma apropiada para las vibraciones cuadrupolares indica que, aproximadamente, todos los nucleones de los núcleos pesados intervienen en el movimiento colectivo.

A diferencia de la absorción de rayos gamma, que excitan las vibraciones dipolares de forma selectiva, la difusión inelástica de partículas cargadas puede excitar varios modos de vibración. Para averiguar las estructuras vibracionales individuales a partir de las intensidades angulares de las partículas difundidas que se miden, los físicos se aseguran de que cada multipolo se encuentre asociado a un valor entero definido L del momento angular (L = 1 para un dipolo, L = 2 para un cuadrupolo). Por lo tanto, las partículas difundidas durante la excitación de una vibración multipolar particular muestran una distribución angular característica del valor L. (Normalmente, los datos experimentales deben ser analizados como la suma de varias estructuras angulares de dispersión procedentes de varias resonancias.)

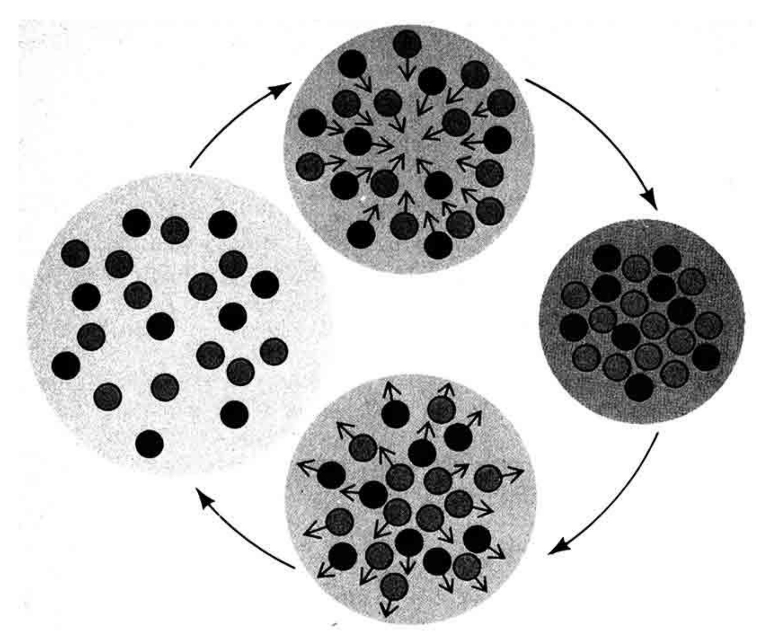


Fig. 2-2. La vibración monopolar gigante, tal como se describe en el texto. A medida que los protones (círculos oscuros) y los neutrones (círculos claros) se mueven hacia dentro y hacia fuera de su posición de equilibrio, el núcleo «respira» y su densidad oscila. (Según G. F. Bertsch, Scientific American, mayo 1983, pág. 62.)

La vibración *monopolar* gigante $L = 0$ es un *modo pulsante* en el cual el volumen nuclear se expansiona y se contrae rítmicamente, tal como ilustra la figura 2-2. El descubrimiento experimental de una resonancia gigante monopolar no fue sencillo ya que, generalmente, se encuentra enmascarada por la resonancia cuadrupolar (excepto para ángulos muy pequeños de difusión, en los que el sistema detector debe ser diseñado muy cuidadosamente para evitar falsas cuentas debido al intenso haz de proyectiles no desviados). En 1977, un grupo de la Universidad de Texas A&M identificó la resonancia monopolar gigante al estudiar la dispersión inelástica de partículas alfa en ángulos tan pequeños como 3 grados de la dirección del haz de proyectiles. El modo monopolar fue reconocido gracias a su característica estructura para valores pequeños del ángulo. Posteriormente, se obtuvieron nuevas evidencias gracias a la regla de la suma monopolar, la cual fue completamente satisfactoria debido a la intensidad de la difusión observada, tal como era de esperar para un modo colectivo en el cual participan todos los nucleones.

Las vibraciones monopolares son particularmente importantes debido a que su frecuencia está relacionada directamente con la compresibilidad de la materia nuclear, una propiedad no medida hasta el momento. El valor de la compresibilidad obtenido a partir de las frecuencias de las vibraciones monopolares está relacionado con los valores predichos por varios modelos teóricos. Para apreciar las extraordinarias diferencias entre la materia nuclear y la materia atómica ordinaria, basta tener en cuenta que la última es 10^{22} veces más compresible, es decir, que la materia ordinaria es casi infinitamente blanda por comparación.

Existen evidencias preliminares de la existencia de resonancias gigantes multipolares de valores mayores de L, tales como la vibración octupolar en forma de pera, $L = 3$. Los iones pesados resultarían proyectiles especialmente adecuados a la hora de excitar vibraciones con valores altos de L, ya que pueden transferir una gran cantidad de momento angular al núcleo blanco. Asimismo, los iones pesados son posibles variantes de las vibraciones monopolares o cuadrupolares en las cuales los protones y neutrones se mueven en oposición en lugar de juntos. Tales vibraciones desfasadas no han sido exploradas todavía de forma sistemática, pero existen evidencias recientes de que el modo monopolar se excita selectivamente en reacciones que transfieren la carga entre el pión proyectil y el núcleo blanco.

De hecho, el pión ha resultado ser un indicador eficaz de los papeles relativos jugados por los protones y los neutrones en las excitaciones nucleares, ya que haces de piones positivos y negativos pueden ser enfocados directamente sobre un blanco. Los piones positivos que poseen un cierto intervalo de energías interactúan con los fotones blanco por lo menos de forma diez veces más intensa que con los neutrones blanco; del mismo modo, los piones negativos interaccionan mucho más fuertemente con los neutrones. La comparación directa de los resultados obtenidos con estas dos sondas proporciona, por lo tanto, una medida de la importancia relativa de los protones y neutrones en una particular vibración nuclear. Por ejemplo, se ha demostrado que algunos estados excitados de los núcleos ligeros son únicamente excitaciones de neutrones o de protones. Las diferencias entre neutrones y protones blanco pueden ser detectadas mediante la difusión de piones positivos y negativos incluso en el caso en que las diferencias sean muy pequeñas, como es el caso de las vibraciones cuadrupolares gigantes en los núcleos pesados. Por lo tanto, esta técnica proporciona un medio realmente sensible y eficaz de comprobar la teoría de las vibraciones nucleares.

Vibraciones gigantes de spin

Además de las vibraciones provocadas por el movimiento de los nucleones, los spines de los nucleones también pueden exhibir un comportamiento colectivo. Un nucleón tiene una estructura de «barra imantada» a lo largo del eje de su spin, de manera que un modo colectivo de spin también lo es de magnetismo. Los nucleones tienen spin ½, y, de acuerdo con la mecánica cuántica, el spin del nucleón medido a lo largo de un eje de coordenadas puede ser únicamente +½ (spin orientado paralelamente al eje) o –½ (spin antiparalelo). Bajo determinadas condiciones, el spin de un nucleón puede oscilar entre +½ y –½, cambiando al mismo tiempo la dirección del campo magnético que produce.

Recientemente, investigadores del ciclotrón de la Universidad de Indiana fueron capaces de dar la vuelta al spin y al isospín de los nucleones del núcleo sin perturbar la distribución espacial de los nucleones mediante el uso de haces de protones de 100 a 200 M*e*V. Por lo tanto, fueron capaces de excitar las resonancias de Gamow-Teller sin utilizar otras formas de

excitación. La trampa consiste en observar la salida de un neutrón del núcleo exactamente en la misma dirección en que entró el protón. El neutrón posee aproximadamente la misma velocidad que el protón, de manera que la ley de conservación del momento demuestra que prácticamente no se transfirió momento al núcleo, y, por lo tanto, el único cambio en el interior del núcleo es que un neutrón se convirtió en un protón y que su spin posiblemente cambió. En los experimentos de este tipo que actualmente se llevan a cabo, los spins del protón y del neutrón se miden de forma exacta.

Es fácil contar el número de neutrones que pueden convertirse en protones en el núcleo, por lo que puede calcularse con gran precisión la probabilidad del proceso de Gamow-Teller para un núcleo con respecto a un neutrón libre. Un resultado sorprendente de estas mediciones es que la probabilidad total real es sólo del 50 al 75% de la probabilidad calculada. Una explicación posible para este fenómeno es que la transición de neutrón a protón no es un proceso elemental, sino que es de suponer que los nucleones están formados por quarks y que el proceso de Gamow-Teller se debe a un cambio spin-isospín de los quarks que los constituyen. El cambio de un quark puede convertir, realmente, un neutrón en un protón, pero también puede cambiar el neutrón en una configuración de alta energía denominada *resonancia delta* (que es una resonancia bariónica). En este modelo, los estados delta deben ser contabilizados al calcular la probabilidad total de transición, para que sea posible obtener la probabilidad correcta. Todavía no se han realizado cálculos completos siguiendo este modelo, así que el problema de la baja probabilidad del fenómeno todavía no ha sido resuelto.

Un estudio conjunto entre la Universidad Estatal de Michigan y Orsay, que se efectúa en Orsay, Francia, ha identificado un componente de la excitación de Gamow-Teller en la cual la carga del núcleo permanece idéntica, lo cual es extraño ya que, de acuerdo con los argumentos de simetría de isospín, esta excitación no debería existir. Las medidas deben efectuarse tan cerca de la dirección del haz como sea posible, con una capacidad de discriminación entre el haz y las partículas dispersadas, las cuales tienen energías similares. La solución experimental, en este caso, fue utilizar un espectrómetro magnético extremadamente preciso que pudiera identificar los protones desviados y que operase cerca del haz.

Deltas en los núcleos

Un aspecto interesante de las resonancias de Gamow-Teller procede de la hipotética importancia de la resonancia delta en este fenómeno de baja energía. Los deltas son estados excitados de alta energía de los bariones. El primero (el más bajo) de tales estados tiene una masa de 1,23 G*e*V comparada con los 0,94 G*e*V de un nucleón, y este gran exceso de masa-energía provoca su desintegración (en un pión y un nucleón) incluso antes de que haya atravesado el diámetro del núcleo. Con una vida tan corta, el delta no puede ser considerado como una verdadera partícula, aunque juegue un papel esencial en los fenómenos nucleares.

La importancia de los delta en física nuclear posee un papel especialmente destacado en los experimentos con piones. Cuando un pión cuya energía es de varios centenares de M*e*V colisiona con un núcleo, uno de los nucleones puede absorber el pión y convertirse en un delta. Esta transformación crea una vacante, es decir, un *agujero*, en el estado energético ocupado originalmente por el nucleón. El progreso de la reacción queda determinado entonces por la dinámica del sistema delta-agujero en su propagación a través del núcleo. Una comparación de predicciones basadas en este mecanismo con experimentos pion-núcleo (llevados a cabo en las *fábricas de piones* tales como Los Alamos Mesón Physics Facility) proporciona respuestas a varios fenómenos de gran interés, como, por ejemplo, la modificación de la vida media y de la masa de un delta debido al ambiente nuclear, la naturaleza de la absorción de piones por los nucleones, y la naturaleza de la interacción nucleón-delta. Estos experimentos resultan interesantes para mostrar que un delta está sustancialmente menos ligado que un nucleón en el centro de un núcleo, mientras que su potencial dependiente del spin es comparable al del nucleón. El estudio de la propagación de otras resonancias bariónicas acaba justo de empezar.

Resultados de la dispersión de electrones

Existen varias razones por las cuales la difusión de electrones de alta energía es una poderosa herramienta para estudiar la estructura nuclear. Primero, la interacción es electromagnética y por lo tanto más fácil de comprender. (La parte débil de la interacción electrodébil sólo juega un papel significativo si se tienen en cuenta los únicos efectos que provoca,

como, por ejemplo, la violación de la paridad.) Esto implica que los resultados experimentales tienen una interpretación directa en términos de la estructura mecánico-cuántica del blanco. (Por el contrario, a menudo es difícil separar el mecanismo de reacción de la estructura del blanco en la difusión hadrónica de partículas que interactúan fuertemente.) Evidentemente, estos comentarios también pueden aplicarse a la difusión de fotones, pero una gran ventaja adicional de la difusión electrónica es que en una energía de *excitación nuclear fija* puede variarse el momento transmitido por el electrón al núcleo y señalar las densidades de carga y corriente, incluso en el interior profundo del núcleo. Por lo tanto, el acelerador de electrones es un enorme microscopio capaz de estudiar la distribución espacial de cargas y corrientes en el interior del núcleo, el cual tiene un diámetro típico de 10^{-13} cm. Para apreciar distancias cada vez más pequeñas, se necesitan momentos y transferencias de momentos cada vez más elevadas, lo que implica energías electrónicas cada vez mayores.

La densidad de carga en el núcleo proviene de la distribución de protones, y una parte de la corriente se debe al movimiento de éstos. Tanto el neutrón como el protón poseen un pequeño momento magnético y, por lo tanto, cada uno se comporta como un pequeño imán. Este magnetismo intrínseco también contribuye a la interacción electromagnética de los electrones con el núcleo. Además, existen *corrientes de intercambio* en el núcleo debido a la presencia de piones virtuales y otros mesones cargados.

Otra característica de la dispersión electrónica es que permite obtener el *perfil de excitación* nuclear por medio de variaciones del momento transferido al blanco, teniendo en cuenta que en los intercambios pequeños de momento, el espectro está dominado por transiciones dipolares eléctricas. Sin embargo, si el intercambio de momento es grande, se pueden producir las interacciones que requieren un momento angular elevado, por lo que es posible investigar los estados de spin alto. Asimismo, puesto que la interacción del electrón con la magnetización intrínseca aumenta cuando se consideran intercambios de momento y ángulos de difusión elevados, es posible examinar estados de spin grande de carácter magnético.

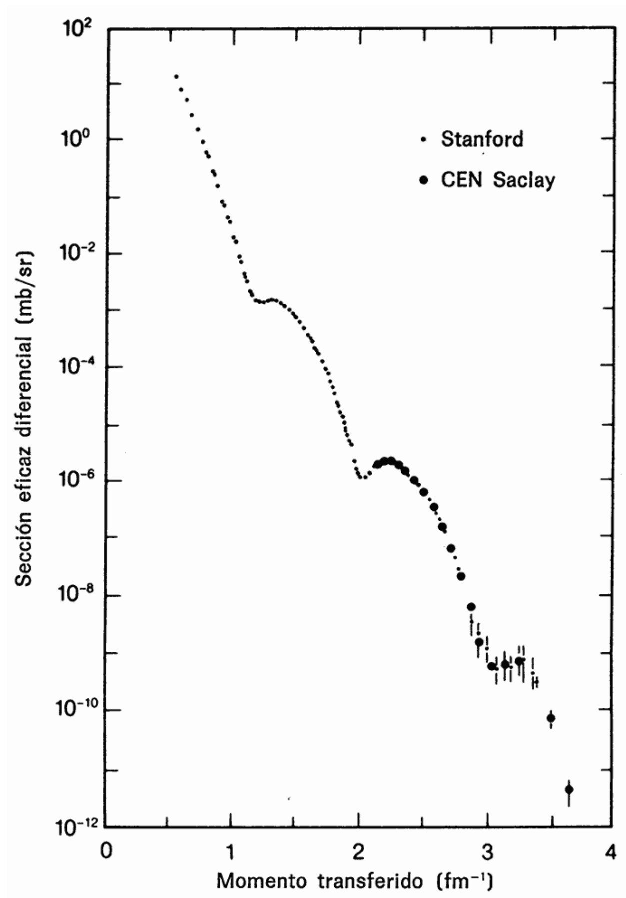
Finalmente, gracias a los elevados intercambios de momento y energía que pueden alcanzarse en el acelerador lineal de Stanford (Stanford Linear Accelerator Center: SLAC) ha sido posible estudiar las estructuras pequeñas de los sistemas nucleares y observar los quarks puntuales en el interior de neutrones y protones.

Desafortunadamente, no se pueden mencionar aquí todos los avances recientes producidos gracias a la difusión de electrones, así que a continuación se mencionarán dos casos que servirán de ejemplo general.

La *difusión elástica de carga* de los electrones por los núcleos permite medir la distribución espacial detallada de la carga en el interior del núcleo en su estado fundamental, y de ahí provienen los conocimientos precisos de los tamaños y formas de los núcleos. El proceso básico es análogo al que se observa cuando la luz pasa a través de una pequeña abertura circular, es decir, las ondas procedentes de cada parte de la abertura interfieren entre sí produciendo una imagen de difracción formada por anillos luminosos de intensidad variable que pueden observarse sobre una pantalla. Puesto que una hipótesis básica de la mecánica cuántica es que los electrones también poseen propiedades ondulatorias, en este caso se observa una imagen de difracción (de tipo algo diferente) cuando éstos son distribuidos por una carga nuclear.

Para apreciar los detalles de esta densidad de carga debida a las órbitas y capas nucleares es preciso medir las energías electrónicas con una precisión superior a 1 parte en 20.000, cantidad inalcanzable hace 10 años. Actualmente se utilizan espectrómetros que poseen la resolución energética adecuada, entre los que cabe destacar los del CEN Saclay (Francia) y los del MIT Bates Accelerator Laboratory (Acelerador Bates del Instituto de Tecnología de Massachusetts, EE.UU.). En la fig. 2-3 se muestra un ejemplo de estructura de difracción producida por los electrones dispersados por un blanco de calcio-40. Tales datos pueden utilizarse para efectuar mapas detallados de las distribuciones espaciales de carga en los núcleos.

Fig. 2-3. Una imagen nuclear de difracción obtenida mediante la dispersión elástica de electrones de 500 M*e*V por núcleos de calcio-40. Obsérvese que las medidas se efectuaron sobre el enorme rango de unos 12 órdenes de magnitud. (B. Frois, en Nuclear Physics with Electromagnetic Interactions, H. Arenhóvel y D. Drechsel, eds., Vol. 108 de Lecture Notes in Physics, Springer-Verlag, Berlín, 1979.) ►



Por otro lado, en los núcleos de las tierras raras, estas distribuciones se apartan de la forma esférica debido a las fuerzas de marea ejercidas por los nucleones exteriores que orbitan alrededor de la región central (v. fig. 2-4). En un experimento reciente, se compararon las distribuciones de carga de dos núcleos vecinos, cuya diferencia de carga se encontraba concentrada en picos situados a diversas distancias del centro del núcleo. Este hecho podría atribuirse a la presencia de un protón extra en una capa particular, tal como era de esperar a partir del modelo de capas; sin embargo,

los picos eran menores de lo esperado, indicando que debían estar presentes otros efectos más allá de los que se habían incorporado en el modelo en capas.

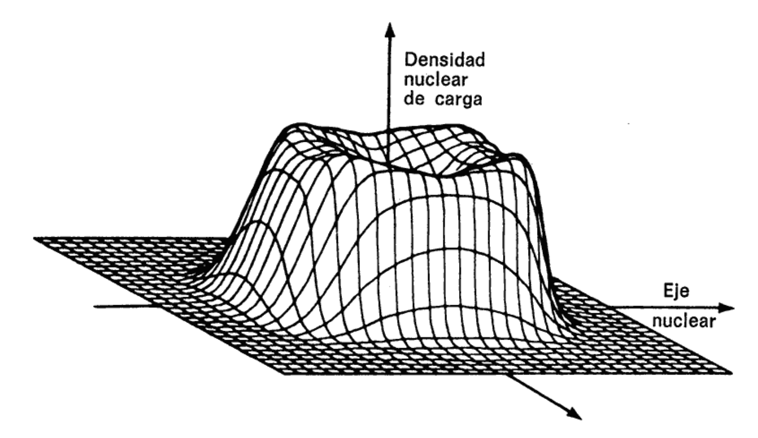


Fig. 2-4. Perspectiva de la distribución de carga eléctrica en el iterbio- 174. Este núcleo aparece ligeramente elongado, con su densidad de carga máxima en regiones situadas lejos del centro. (J. Heisenberg, en Advan- ces in Nuclear Physics, Vol. 12, J. W. Negele y E. Vogt, eds., Plenum Press, Nueva York, 1981.)

Llegados a este punto, cabe mencionar el fenómeno de la *difusión magnética elástica.* Cada núcleo, si su estado fundamental posee momento angular, también se comporta como un pequeño imán. Del mismo modo que los cambiantes elementos de la densidad de carga contribuyen a la carga total del núcleo, el momento magnético recibe contribuciones de los cambiantes elementos de la densidad de magnetización. Si se mide la imagen de difracción de los electrones difundidos elásticamente por un núcleo *hacia atrás,* se puede medir la distribución de esta densidad de magnetización. Puesto que los spins y momentos angulares de los protones y neutrones individuales se agrupan en parejas de sentido contrario, la magnetización total procede típicamente del último nucleón de valencia. Los neutrones también contribuyen a la difusión magnética elástica puesto que poseen a su vez un pequeño momento magnético intrínseco. Si se mide la imagen de difracción de los electrones para valores altos del momento transferido se puede apreciar la distribución espacial de la última partícula de valencia —protón o neutrón— en el núcleo. La figura 2-5 muestra la

distribución espacial de esta magnetización nuclear, determinada a partir del vanadio-51. La órbita espacial del último nucleón está claramente definida.

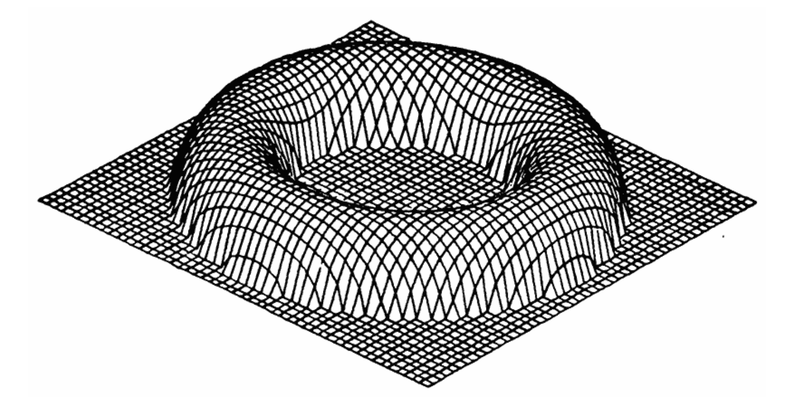


Fig. 2-5. Perspectiva de la superficie de densidad de magnetización igual a ½ de la máxima en el núcleo de vanadio-51. El diagrama, calculado a partir de los datos obtenidos mediante la dispersión elástica de electrones, revela la órbita circular del último nucleón de valencia en el núcleo. (T. W. Donnelly y J. D. Walecka, Nuclear Physics A201, 81 [1973].)

La difusión de electrones juega un papel crucial en la interpretación de los resultados de los experimentos que utilizan otro tipo de proyectiles, tales como protones y piones, realizados en nuevos aceleradores e instalaciones experimentales desarrolladas durante la última década. Todas estas partículas se utilizan actualmente como sondas de precisión, proporcionando interacciones complementarias con las cuales es posible cartografiar la materia nuclear.

El modelo de bosones interactivos

Las simetrías geométricas se utilizan para describir propiedades especiales simples de estructuras complejas. Ejemplos de simetrías geométricas, tales como las relacionadas con las reflexiones y rotaciones, pueden ser fácilmente reconocidos en muchos objetos, incluyendo los núcleos. Las simetrías dinámicas están relacionadas con un orden igualmente simple

que puede encontrarse a veces en las leyes que gobiernan el comportamiento de los sistemas físicos. Debido a la complejidad del problema nuclear de muchos cuerpos, no se consideró que tales simetrías pudieran jugar un papel importante en la física nuclear; sin embargo, se ha descubierto que la posición y propiedades de transición de los estados excitados de un amplio rango de núcleos par-par (aquellos que poseen un número par de protones y de neutrones), puede ser calculada con precisión utilizando una simetría en la cual los protones y neutrones de valencia (aquellos situados en el exterior de las capas completas o región inerte) se aparean para formar bosones (partículas de spin entero) de spin 0 o 2. Este *modelo de bosones interactivos* se caracteriza por una particular estructura de niveles energéticos nucleares (y sus transiciones) que sólo dependen del número de bosones existentes. La estructura fue descubierta por primera vez en el platino-196 en 1978. Esta simetría ya ha proporcionado una unificación de varios modos de movimiento colectivo diferentes (por ejemplo, rotación, vibración y el comportamiento de transición que se encuentra entre estos dos casos límites). Todos estos modos pueden ser descritos de una manera uniforme a través de la simetría asociada con el modelo de bosones interactivos, dependiendo simplemente del número de bosones de valencia (interactuantes) presentes en cada núcleo. Debido a la manera en que este modelo utiliza las propiedades del modelo de capas para describir las propiedades colectivas de los núcleos, es de esperar que se logre una unificación entre el modelo de capas y los modelos colectivos de los núcleos.

El desarrollo más reciente de este modelo ha consistido en su generalización a núcleos que poseen un número impar de protones y neutrones. Este avance implica el acoplamiento entre nucleones desapareados (fermiones) y nucleones apareados (bosones) de núcleos vecinos, lo que permite el cálculo de las propiedades de los estados nucleares en núcleos de masa impar y par a *la vez,* utilizando la misma fórmula. Este acoplamiento se caracteriza por una *supersimetría.* Un buen ejemplo de tal comportamiento se obtiene al comparar el iridio-193 y el osmio-192, así como en unos pocos núcleos vecinos tales como el iridio-191. Sin embargo, a diferencia del modelo de bosones interactivos, que ha obtenido un resonante éxito sobre un amplio rango de núcleos par-par, sólo existen, por el momento, unos pocos ejemplos de supersimetría que hayan tenido éxito, mientras se realizaban fallos notables de sus predicciones supersimétricas

sobre aquellos núcleos que se apartan ligeramente de esta región. De momento, no está claro si esto es debido a los problemas del modelo supersimétrico y sus cálculos o si es debido a la incapacidad de los físicos para organizar y analizar de manera adecuada los resultados experimentales de manera que pueda obtenerse la esperada estructura supersimétrica.

Dada una estructura compleja y aparentemente aleatoria, no siempre resulta evidente dónde o cómo se debe orientar la propia perspectiva con el objeto de apreciar la simetría subyacente. Sin embargo, puesto que existe la posibilidad de que una supersimetría tan importante exista en este caso (la primera supersimetría fermión-bosón encontrada en la naturaleza), esta área de la espectroscopia recibirá sin duda mucha más atención en un futuro próximo. El resultado debería clarificar la interpretación y comprensión de las distintas conexiones entre los núcleos de masa impar y par, así como de la conexión mucho más general entre los fermiones y los bosones.

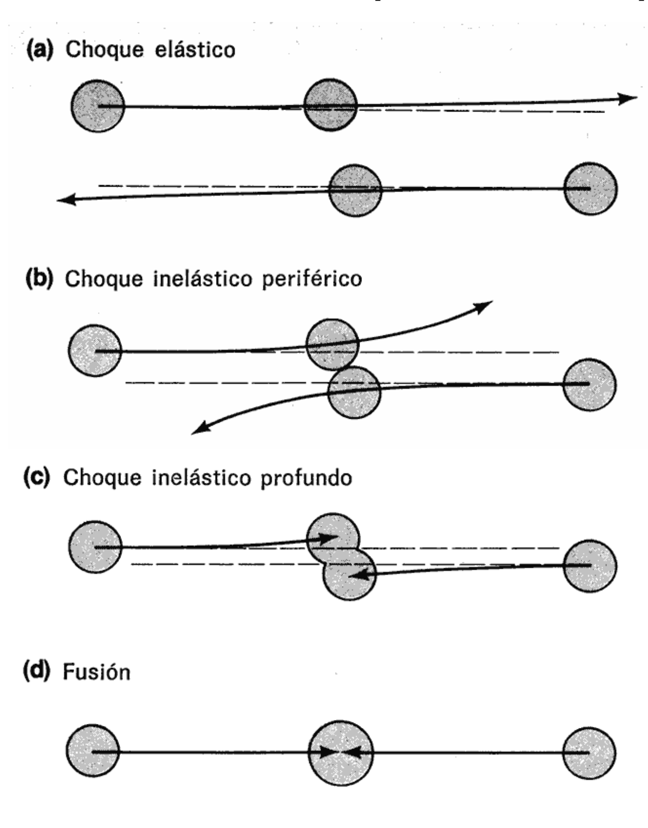
DINÁMICA NUCLEAR MACROSCÓPICA

Un protón de alta energía que colisione con un núcleo puede atravesarlo interactuando únicamente con sólo unos cuantos neutrones. Pero si el proyectil es él mismo un núcleo (ion pesado), la colisión implica la interacción de dos sistemas de muchos cuerpos. El gran número (que puede elevarse a varios centenares) de nucleones que interactúan fuertemente en una colisión de iones pesados puede alterar drásticamente las formas, la proporción neutrón-protón o las energías internas de excitación de las parejas que colisionan. Un programa importante en la física de los iones pesados prevé utilizar estos efectos para estudiar las propiedades macroscópicas implicadas en el movimiento cooperativo de muchos nucleones.

Las colisiones entre iones pesados pueden dar lugar a nuevos fenómenos que no aparecen cuando el proyectil es una única partícula, ya que pueden romper la materia nuclear en pedazos y desintegrar completamente la materia nuclear en nucleones, así como transferir grandes cantidades de momento angular, provocando la inestabilidad y rotura de ésta. Una fuente de interés adicional en torno a este campo es la amplia variedad de proyectiles accesibles. Algunos experimentos han llegado a alcanzar energías de varios G*e*V por nucleón, pero los estudios más extensos sobre el tema

se han realizado en el rango de energías situado por debajo de los 20 M*e*V por nucleón.

Una visión del significado del término «baja energía» en la física de los iones pesados lo proporciona el ejemplo del núcleo de calcio-40 a 10 M*e*V por nucleón, el cual posee una energía de 400 M*e*V. La física de los iones pesados necesita, de hecho, cantidades importantes de energía para sobrepasar la potente barrera repulsiva ejercida por las fuerzas de Coulomb entre los dos núcleos. El corto alcance de las fuerzas nucleares, que produce interesantes fenómenos en las reacciones entre iones pesados, no puede actuar de forma efectiva a menos que los dos núcleos se toquen.



◄ **Fig. 2-6.** Ejemplos de algunos de los tipos de interacciones nucleares que ocurren en las colisiones (aquí se muestran en el modo colisional en lugar del modo de blanco fijo) para diferentes valores del parámetro del impacto. Para grandes valores (a), los núcleos no se tocan en absoluto. Para valores próximos a cero (d), la colisión puede dar lugar a la fusión de los dos núcleos.

Un rasgo característico de los iones pesados de baja energía es su pequeña longitud de onda comparada con las dimensiones de la región de colisión alrededor del núcleo blanco. Su onda mecánico-cuántica natural queda suprimida, y pueden ser imaginados en forma de partículas clásicas que poseen una trayectoria bien definida. De acuerdo con la imagen de trayectoria clásica las colisiones de iones pesados de baja energía pueden clasificarse de acuerdo con su parámetro *de impacto* (v. fig. 2-6), el cual es un número que describe la distancia a la que se encuentra la colisión de un choque frontal. Para valores grandes del parámetro de impacto, el proyectil y el núcleo blanco nunca se acercan lo suficiente como para tocarse, de manera que sus trayectorias están gobernadas por las fuerzas repulsivas de Coulomb que se ejercen entre sí.

En parámetros de impacto intermedios, los núcleos se rozan lo justo para que las fuerzas nucleares entren en juego. Un fenómeno típico durante una colisión rasante es el trasvase de uno o más nucleones entre la pareja que colisiona, o la existencia de modos colectivos. Por el contrario, en valores relativamente pequeños del parámetro de impacto, una parte sustancial del proyectil golpea parte del blanco. Sorprendentemente, los núcleos emergen de las interacciones de los nucleones con sus identidades originales intactas, dan o toman unos pocos nucleones, pero con una inversión importante de energía en su calentamiento. Este tipo de fenómeno, denominado *colisión inelástica profunda*, ha sido objeto de estudios importantes durante la década de los 80, tema que se discutirá con más detalle en próximos capítulos.

Uno colisión aproximadamente frontal (parámetro de impacto muy pequeño) puede proporcionar la fusión de los dos núcleos que colisionan, dando lugar a un único *núcleo compuesto* que vive lo suficiente como para que los nucleones alcancen un grado de equilibrio en el que comparten energía y momento angular. Sin embargo, el núcleo compuesto de este modo es inestable y se desintegra al cabo de unos 10^{-19} segundos. Un modo de desintegración consiste en la emisión de varias partículas de masa pequeña, tales como nucleones y partículas alfa. Otra posibilidad es que se

fisione en dos fragmentos más pequeños. Durante la fisión, el núcleo compuesto se comporta de forma muy similar a una gota líquida, estrangulándose a medida que los dos trozos se separan. En algunas ocasiones, el «cuello» se reestructura para formar un tercer elemento de la fisión (habitualmente una partícula alfa), un fenómeno que tiene una analogía conocida en la rotura de las gotas de líquidos reales.

Las reacciones de fusión como las descritas aquí (que no deben ser confundidas con la fusión termonuclear de los núcleos ligeros) se han utilizado para producir especies nucleares exóticas, para determinar el máximo momento angular que pueden aguantar los núcleos y para iluminar la dinámica del proceso de fisión. Estas reacciones son en su mayoría una característica del régimen de baja energía, a altas energías o relativistas, en el que los choques frontales liberan tanta energía que las parejas que colisionan se rompen en fragmentos más pequeños.

Cuando un haz de iones pesados es dirigido contra un blanco los parámetros de impacto se incluyen entre las posibilidades de colisión; sin embargo, la probabilidad de los iones más pequeños (colisiones aproximadamente frontales) disminuye debido a la menor sección eficaz que presentan. De este modo, se produce energía suficiente para que el proyectil pueda superar la fuerza repulsiva de Coulomb y se produzcan todos los tipos de reacción descritos.

Los conocimientos actuales de las reacciones de iones pesados a baja energía junto con su correspondiente marco teórico abarcan una rica fenomenología. El conjunto completo de progresos efectuado durante la última década no puede describirse adecuadamente en este volumen. En su lugar, se tratarán dos amplios temas representativos de los resultados obtenidos en este campo.

Resonancias en sistemas de iones pesados

El modelo en capas de los núcleos, que tanto éxito ha obtenido, considera a los nucleones individuales moviéndose en un campo de fuerzas promedio producido por el resto de los nucleones. El éxito de este modelo se basa en el principio de exclusión de Pauli, que establece que no puede haber dos nucleones que tengan idénticos estados de movimiento. La fuerza nuclear fuerte hace que los nucleones libres (aquellos que no están ligados

en el interior del núcleo) se dispersen fuertemente durante una colisión. No obstante, en el caso de los nucleones en el interior de los núcleos, el principio de Pauli disminuye considerablemente la interacción nucleón-nucleón al prohibir que se alcancen muchos estados finales que normalmente se producirían durante el proceso de difusión.

En el modelo nuclear en capas, la energía de un nucleón ligado se restringe a unos determinados valores cuantizados, de manera similar a como el sonido de una guitarra queda restringido al tono fundamental y a ciertos sobretonos. El modelo en capas describe los niveles de energía de un núcleo como la subida de uno o varios nucleones desde los niveles fundamentales bajos hasta los niveles excitados normalmente vacíos.

Un resultado general de la mecánica cuántica de los sistemas formados por muchos cuerpos es que los niveles de energía que le son permitidos al núcleo están cada vez menos espaciados a medida que aumenta la energía por encima del nivel fundamental. Los primeros niveles bajos están en general bastante espaciados y pueden ser excitados selectivamente para su estudio si los proyectiles poseen una energía situada dentro de una banda estrecha. En el caso de energías de excitación más altas, sin embargo, los niveles energéticos están tan cerca que el abanico de energías del haz de proyectiles solapa muchos niveles, difuminando los detalles. Otro factor que contribuye a esta confusión es la corta vida media de los estados más excitados; como consecuencia del principio de incertidumbre de Heisenberg, los niveles energéticos de tales estados se ensanchan.

En algunos experimentos con iones pesados, aparecen súbitamente *resonancias* en las secciones eficaces que se observan al variar la energía de bombardeo. Por ejemplo, cuando los proyectiles de oxígeno-16 son difundidos por núcleos blanco de oxígeno-16, la curva de la sección eficaz exhibe amplios e irregulares picos a medida que la energía del proyectil aumenta. Sin embargo, sólo se observa una suave variación con la energía si se utiliza la reacción del oxígeno-18 consigo mismo. La explicación a este fenómeno está relacionada con el hecho de que en el oxígeno-16 las capas de protones y neutrones están completas, mientras que el oxígeno-18, con dos neutrones de más situados fuera de las capas completas, posee numerosos estados excitados de baja energía. Puesto que el oxígeno-16 sólo posee unos cuantos estados a través de los cuales puede realizarse la reacción, los efectos mecánico-cuánticos de interferencia no quedan difuminados y son fácilmente reconocibles.

Cuando un proyectil de carbono-12 reacciona con un núcleo blanco de carbono-12, la curva de la sección eficaz muestra delgados picos que sugieren la formación de *moléculas nucleares* de vida relativamente larga. Un sistema ligado, tal como una molécula química, existe porque las fuerzas atractivas predominan sobre las repulsivas. Posiblemente, dos núcleos podrían formar una «molécula» si la parte atractiva externa de la fuerza nuclear pudiera equilibrarse con la parte interna y repulsiva de la fuerza nuclear, es decir, la fuerza repulsiva de Coulomb y la fuerza centrífuga que surge cuando dos núcleos giran uno alrededor de otro. Debido al modo en que estas fuerzas varían con la distancia, tal equilibrio no es posible en la mayoría de los núcleos e incluso si se alcanzara, no duraría demasiado. Si la fuerza atractiva dominara sobre las repulsivas, el núcleo se aplastaría, y si fuera al revés, los núcleos se volatilizarían.

De acuerdo con el principio de incertidumbre, la delgadez de las resonancias en la reacción de dos núcleos de carbono-12 sugiere vidas medias comprendidas entre 10^{-21} y 10^{-22} segundos para estos estados. Aunque esto es increíblemente breve para la escala de tiempo macroscópica del mundo cotidiano, es varias veces más largo que el tiempo de interacción en las reacciones nucleares ordinarias, lo cual es suficiente para que una molécula nuclear pueda efectuar varias rotaciones alrededor de su centro de masas.

Colisiones inelásticas profundas

La imagen del núcleo compuesto para las reacciones ha sido utilizada durante largo tiempo con éxito en física nuclear, debido a que su formación es una reacción habitual cuando los proyectiles son nucleones de baja energía o partículas alfa. Las colisiones aproximadamente frontales entre iones de baja energía también producen núcleos compuestos. Pero cuando el parámetro de impacto se encuentra entre los límites rasante y frontal, lo más probable es que la interacción entre iones pesados de baja energía tenga lugar en forma de *colisión profunda inelástica* (v. fig. 2-7).

Las colisiones inelásticas profundas despliegan nuevos fenómenos inéditos en las reacciones de núcleo compuesto, y por lo tanto han recibido una atención importante en la física de los iones pesados. En ellas intervienen algunos de los mismos mecanismos de reacción que intervienen en

la fisión, pero pueden ser estudiadas de manera controlada, por ejemplo, mediante el adecuado uso de proyectiles, blancos y energías.

En una colisión inelástica profunda, el núcleo proyectil puede perder la mayor parte de su energía a medida que se sumerge en el núcleo blanco; la energía perdida es a menudo tan elevada que los fragmentos de la reacción que emergen se encuentran inicialmente casi en reposo, separándose a continuación gracias a la fuerza repulsiva de Coulomb que ejercen entre sí. Pero, a diferencia de las reacciones que se producen a través de la formación de un núcleo compuesto, una colisión inelástica profunda mantiene una[1] cierta «memoria» de las condiciones iniciales, de manera que los fragmentos de la reacción están fuertemente relacionados con los núcleos que colisionaron inicialmente.

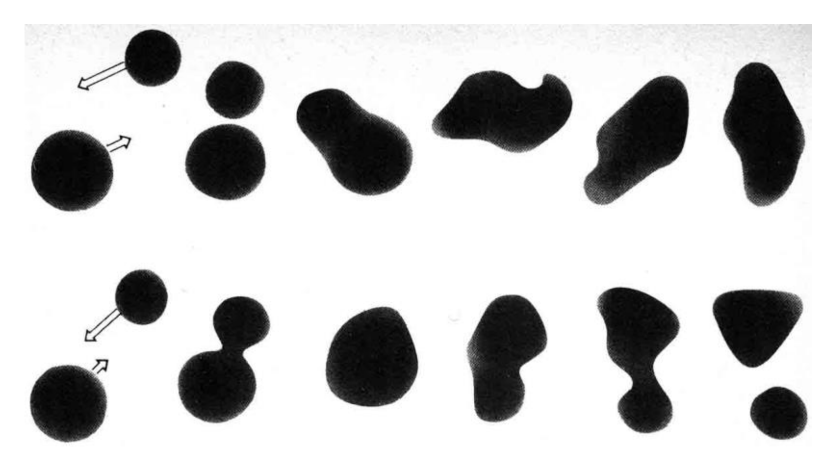


Fig. 2-7. Imagen artística de la densidad nuclear calculada durante dos colisiones diferentes de un núcleo de oxígeno-16 con un núcleo de calcio-40 que poseía una energía en el laboratorio de 315 M*e*V. Para simplificar la imagen, la situación se visualiza aquí en el modo colisional en lugar del modo blanco fijo. Arriba: Para un parámetro de impacto grande, el sistema que reacciona produce un momento angular muy grande; el núcleo compuesto altamente excitado que se forma (níquel-56) se mantiene unido temporalmente antes de disipar su energía mediante la evaporación de nucleones. Abajo: Para parámetros de impacto más pequeños, el núcleo compuesto adquiere un momento angular menor, pero se rompe en dos casi inmediatamente debido a que la mayor parte de la energía cinética de la colisión inelástica profunda ha sido transformada en energía interna de excitación. (Cortesía de M. Weiss, Lawrence Livermore National Laboratory.)

Una colisión inelástica profunda presenta propiedades aparentemente contradictorias, ya que las pérdidas sustanciales de energía aparentan producir una colisión violenta, a pesar de que la retención de la identidad de los productos sugiere una colisión relativamente suave. La aproximación teórica que más éxito ha tenido para comprender esta paradoja indica que los núcleos parten con valores de los parámetros básicos, tales como el cociente de protones o neutrones, energía, momento angular y masas adecuados, únicamente para que los dos núcleos sean estables cuando están lejos uno del otro. No obstante, el nuevo equilibrio estable en el ambiente de la colisión requiere diferentes valores de estos parámetros, mientras que durante la colisión, cada una de estas propiedades empieza a desplazarse hacia los nuevos valores.

El valor de una propiedad no puede cambiar, sin embargo, sin algún mecanismo que la gobierne. En general, los mecanismos correspondientes a diferentes propiedades operan a diferentes ritmos, de manera que algunas propiedades se mueven más rápidamente que otras hacia sus nuevos valores de equilibrio. Los ritmos pertinentes en una colisión profundamente inelástica pueden obtenerse experimentalmente utilizando un «reloj» interno durante la reacción. La colisión fuera de centro provoca la rotación del sistema, de manera que el ángulo de rotación aumenta con el transcurso del tiempo; los fragmentos expulsados a pequeños ángulos de rotación corresponden, por la tanto, a una fase temprana de la reacción. El análisis de los fragmentos de la reacción muestra que el cociente protón-neutrón se acerca muy deprisa a su valor de equilibrio, aproximadamente en 10^{-22} segundos. A continuación, la energía alcanza su valor de equilibrio, seguido del momento angular. Las masas de los fragmentos tardan tanto en alcanzar el equilibrio (aproximadamente 50 veces más que el empleado por la proporción neutrón-protón) que la colisión ha terminado antes que las masas hayan tenido tiempo de cambiar respecto a sus valores originales. Proporcionar modelos precisos para los diferentes mecanismos de gobierno ha constituido un reto para los teóricos nucleares, puesto que combinan movimientos colectivos con la naturaleza estadística del acercamiento al equilibrio.

La materia nuclear no está altamente excitada en las colisiones inelásticas profundas a baja energía y existen relativamente pocos estados excitados que sean accesibles a los nucleones. Bajo estas condiciones, el principio de exclusión de Pauli todavía disminuye más los efectos de la fuerza

nuclear, por lo que un nucleón dado puede moverse con libertad casi absoluta por el interior del núcleo. Las interacciones entre los nucleones ocurren principalmente cerca de la superficie, donde la fuerza media sobre un nucleón ya no es constante. Por lo tanto, los modelos más simples describen a las colisiones inelásticas como el intercambio de nucleones que pueden moverse libremente entre dos núcleos, incluyendo los efectos de la fricción «superficial» en la región de contacto entre ambos fragmentos. Tales modelos resultan muy adecuados en la descripción de los datos experimentales. Una descripción más fundamental se basa en una generalización dependiente del tiempo del modelo en capas, donde el potencial medio experimentado por cada nucleón cambia rápidamente a medida que el sistema colisionante evoluciona hacia el equilibrio.

A pesar de los progresos que se han obtenido en la comprensión de las colisiones inelásticas profundas entre iones pesados, aún falta identificar el mecanismo responsable de la disipación del exceso de energía. En cuanto a la teoría se refiere, los modelos desarrollados con éxito necesitan relacionarse con teorías más fundamentales, y los cálculos efectuados con un potencial promediado sobre el tiempo necesitan extenderse a energías de bombardeo más altas. Experimentalmente, quedan muchas cuestiones por responder. (¿Cómo se transfiere momento angular al sistema que colisiona?, ¿cuál es el mecanismo responsable de la súbita expulsión de partículas ligeras?, ¿cómo cambia el comportamiento del sistema cuando la energía de la colisión se aproxima a la energía interna de los nucleones en el núcleo?, ¿pueden utilizarse las colisiones que se encuentran en la frontera entre la fusión y las colisiones profundas inelásticas para sondear la dinámica a largo plazo de sistemas nucleares inestables?)

EL PROBLEMA NUCLEAR DE MUCHOS CUERPOS

Desarrollar una teoría microscópica de muchos cuerpos, que pueda explicar cuantitativamente la estructura y las interacciones de los núcleos en términos de los efectos acumulativos de las fuerzas individuales nucleón-nucleón (NN), ha sido desde hace mucho tiempo uno de los objetivos principales de la física nuclear. Existen muchos obstáculos en el camino que permitirá conseguir tan ambicioso fin. Primero, la propia fuerza NN no se

conoce con suficiente detalle. La dispersión de nucleones proporciona mucha información, pero sólo en el caso de una situación caracterizada por una energía total constante de los dos nucleones; en un núcleo, donde los nucleones vecinos pueden transferir energía, pueden actuar otros aspectos de la fuerza NN. Además, incluso si se comprendiera la fuerza NN por completo, las técnicas matemáticas de las que se dispone actualmente no permitirían manejar las complejidades del gran número de nucleones en su totalidad, muy cercanos unos de otros, y que interactúan fuertemente en el interior de un núcleo.

No obstante, se han realizado grandes progresos en la teoría microscópica nuclear gracias al continuo aumento del conocimiento sobre la fuerza NN, a la mejora de las técnicas de cálculo y al número de datos precisos sobre la estructura de las interacciones nucleares. Una amplia conclusión de este trabajo es que la tradicional imagen de nucleones que interactúan entre sí no puede explicar por sí sola el comportamiento detallado de la materia nuclear. Parece que las necesarias correcciones deben implicar las fuerzas entre muchos cuerpos, la descripción relativista del movimiento del nucleón, la presencia de mesones virtuales en el núcleo y, por último, la estructura interna quark-gluon de los nucleones. El progreso en la incorporación de estas correcciones en los cálculos de muchos cuerpos será más rápido si los experimentos se dirigen hacia estos puntos concretos.

Los siguientes apartados resumen el estado, así como los éxitos y avances del modelo tradicional basado en nucleones de la materia nuclear y proporcionan una breve información acerca de las correcciones aparentemente esenciales de este modelo.

El núcleo de tres nucleones y la materia nuclear infinita

Los avances en el cálculo de la interacción de muchos cuerpos se comprueban normalmente en torno a dos casos límites, para ver si sería posible su extensión hacia sistemas más complicados. Dos casos que se emplean a menudo son el núcleo formado por tres nucleones y el núcleo infinito formado por protones y neutrones que llenan de manera uniforme todo el espacio a una determinada densidad. Por simplicidad, las masas del neutrón y del protón son iguales en la materia nuclear infinita y se supone que

la repulsión de Coulomb entre protones es inoperante, de manera que sólo se considera la interacción fuerte.

El *núcleo de tres nucleones* es el sistema más sencillo posible de muchos cuerpos. La naturaleza proporciona dos ejemplos reales: el hidrógeno-3 (tritio; un protón, dos neutrones) y helio-3 (dos protones, un neutrón). Existe una gran riqueza de datos experimentales para comprobar las teorías, incluyendo la energía de ligadura (la energía mínima necesaria para separar por completo los tres componentes), la carga y la distribución de masa (radio nuclear), el magnetismo nuclear, y la reacción de los núcleos con fotones, nucleones, muones y piones. Con la ayuda de una nueva técnica matemática, es posible calcular numéricamente las propiedades del hidrógeno-3 y helio-3, una vez que se ha escogido la forma de la fuerza NN.

En la práctica, las elecciones más populares suponen que la fuerza actúa únicamente entre parejas de nucleones (fuerzas entre dos cuerpos). Los diversos parámetros que especifican la fuerza se ajustan para obtener un acuerdo correcto entre las propiedades de los sistemas ligados neutrón-protón (el deuterón). Existen unas cuantas formas admisibles que satisfacen estas restricciones, pero, en general, todas ellas producen una energía de ligadura para el sistema de tres cuerpos que va de 1 a 2 M*e*V (sobre 8 M*e*V) más pequeña y un radio nuclear que excede el real en un 9% aproximadamente. La precisión predicha para la energía de ligadura es más adecuada de lo que podría parecer en un principio, pues la diferencia es relativamente pequeña entre dos términos grandes, aproximadamente iguales, es decir, entre la energía del movimiento de los nucleones y el contenido energético de las fuerzas NN. No obstante, se deben tener seriamente en cuenta los defectos de las interacciones y en la precisión de los cálculos que se han supuesto.

La *materia nuclear infinita* existe en el interior de las estrellas de neutrones. Su utilidad se basa en que evita las complicaciones provenientes de las propiedades de una superficie nuclear. Aunque este tipo de materia no existe en la Tierra, sus supuestas propiedades pueden deducirse a partir de medidas en núcleos reales. La densidad de nucleones de la materia nuclear, 0,16 nucleones por fermi cúbico, y la energía de ligadura media por nucleón, que es de 15,8 M*e*V por nucleón, revisten particular interés. Una tercera propiedad, la compresibilidad, ha sido medida recientemente a par-

tir de las resonancias monopolares gigantes, tal como se ha comentado anteriormente; la compresibilidad proporciona ejemplos del cambio de la energía de ligadura por nucleón cuando cambia la densidad de nucleones.

Durante los años 70, importantes avances en las técnicas matemáticas y en el desarrollo de potentes computadores dieron lugar a una gran cantidad de trabajo teórico que ha eliminado la mayor parte de las contradicciones existentes entre las diversas técnicas a la hora de calcular las propiedades de la materia nuclear. Sin embargo, todavía subsisten las discrepancias entre las predicciones teóricas y los hechos experimentales. Un importante reto a largo plazo para los físicos nucleares consiste en generalizar la tradicional teoría de muchos cuerpos de la materia nuclear de manera que elimine estas discrepancias.

Propiedades de los núcleos finitos

Aunque se están desarrollando técnicas más efectivas, la mayoría de los cálculos de las propiedades de los núcleos reales que se llevan a cabo utilizan una modificación del *método de Hartree-Fock,* el cual fue originariamente inventado para calcular las estructuras electrónicas del átomo y de las moléculas. En este método, se supone que cada nucleón se mueve de acuerdo con una fuerza promedio ejercida por los demás nucleones. Pero la propia fuerza promedio depende a su vez del movimiento de los nucleones, de manera que los cálculos se llevan a cabo de manera interactiva hasta que el movimiento calculado del nucleón y la fuerza media que se supone son mutuamente consistentes. Parte del éxito del método de Hartree-Fock procede del principio de exclusión, el cual inhibe las colisiones de corto alcance de los nucleones en el núcleo, permitiendo de esta manera reemplazar las interacciones de dos cuerpos por una fuerza que varía suavemente a través del interior del núcleo.

Un importante avance en el tratamiento de los núcleos finitos se ha llevado a cabo gracias al *método de Hartree-Fock dependiente de la densidad* (DDHF), el cual tiene en cuenta el efecto de la densidad de los núcleos vecinos sobre la fuerza NN. El método DDHF está bien adaptado para calcular distribuciones de carga y materia en los núcleos, pues sólo se consigue la autoconsistencia cuando el movimiento de los nucleones, la fuerza promedio y la densidad local están de acuerdo. La parte repulsiva a

cortas distancias de la fuerza NN es especialmente importante en los cálculos de núcleos finitos para mantener los nucleones correctamente separados. Si se desea obtener el acuerdo entre la teoría y los experimentos, la interacción NN en el método DDHF debe ampliarse a los términos empíricos adecuados.

Los experimentos de dispersión de electrones han proporcionado imágenes detalladas de las distribuciones nucleares de carga para todos los elementos químicos, desde el centro hasta la periferia de los núcleos. El detalle de las medidas es suficiente para mostrar la variación de las densidades de protones asociadas con la estructura nuclear en capas, lo cual proporciona una excelente comprobación de los métodos DDHF. El acuerdo general con las predicciones teóricas es bueno, pero todavía permanecen algunas pequeñas discrepancias.

Los experimentos de difusión de electrones no proporcionan la distribución de materia en los núcleos, puesto que aquéllos interactúan principalmente con la carga eléctrica de los protones y no «ven» los neutrones. Los protones interactúan con todos los nucleones, y muchos de los datos sobre las distribuciones de materia proceden de la difusión elástica de protones en los núcleos. Cuando la energía de los proyectiles es mucho mayor que la energía de los nucleones ligados (por ejemplo, en «Los Alamos Mesón Physics Facility» pueden obtenerse protones de 800 M*e*V), los efectos de la energía de ligadura no son tan importantes, y la fuerza NN deducida a partir de la difusión de nucleones libres se convierte únicamente en aproximación. Los datos sobre la difusión protón-núcleo pueden entenderse con la ayuda de estos factores para deducir la desconocida distribución de neutrones. Los cálculos DDHF reproducen de forma bastante fiel las distribuciones medidas, pero son más precisos cuando se refieren a las diferencias entre las especies nucleares vecinas que a las densidades absolutas de neutrones.

Los cálculos de núcleos finitos también pueden ser comprobados en condiciones favorables gracias a la medición de la distribución de un nucleón individual en el interior de un núcleo. Un método utiliza la difusión de electrones para medir la distribución de protones en núcleos que sólo difieren en un protón —por ejemplo, talio-205 (81 protones, 124 neutrones) y plomo-206 (82 protones, 124 neutrones); la comparación proporciona la distribución de un protón. Los neutrones en un núcleo se asocian

por parejas con sus spins antiparalelos cancelando su magnetismo intrínseco. Si un núcleo posee un neutrón impar (desapareado), el magnetismo de este neutrón —y por lo tanto su distribución en el núcleo— puede ser visto a través de la difusión de los electrones, especialmente en ángulos grandes durante colisiones que transfieren grandes cantidades de momento del electrón.

Los cálculos DDHF también reproducen claramente las distribuciones de núcleos individuales medidas, del mismo modo que las distribuciones globales de carga y materia. Sin embargo, las discrepancias que aún subsisten parecen indicar la necesidad de correcciones pequeñas, pero significativas, que provengan de los efectos relativistas o de las contribuciones electromagnéticas debidas al intercambio de mesones entre los nucleones del núcleo.

La interacción efectiva NN a energías intermedias

Para calcular correctamente las propiedades de un núcleo finito, la teoría de muchos cuerpos debe evaluar cómo queda modificada la interacción entre dos nucleones en un núcleo debido a la presencia de otros nucleones. La fuerza gravitatoria atractiva entre un planeta y el Sol, o la fuerza repulsiva de Coulomb entre dos electrones en un átomo, pueden ser descritas únicamente en términos de la distancia que los separa. La fuerza efectiva nucleón-nucleón es más complicada, pues depende no sólo de la distancia, sino también del momento, spin e isospín, y todos estos factores se ven afectados en un núcleo por el efecto inhibidor del principio de Pauli.

Con tantos factores a la vez a tener en cuenta, sin lugar a dudas sería beneficioso desarrollar una teoría nuclear que permitiera realizar experimentos que comprobaran significativamente un factor específico cada vez. Un tipo de experimento adecuado a este propósito lo constituye la reacción que involucra la interacción de un nucleón proyectil con sólo un nucleón en el núcleo blanco. Un ejemplo típico de este experimento es la reacción de intercambio de carga de un protón rápido con el carbono-14, en el cual el protón se convierte en un neutrón mientras que el neutrón blanco se convierte en un protón, dejando como residuo un núcleo de nitrógeno-14. Este tipo de reacción (que se discutirá más adelante desde otro punto de vista) implica la transferencia de un pión cargado del protón al neutrón

blanco y posee un interés especial debido a su sensibilidad al campo de piones del interior del núcleo. El blanco, la energía de colisión, el tipo de reacción, y especialmente el estado específico en el que queda el núcleo, pueden escogerse de manera que algún factor de la interacción NN sea dominante. El progreso en el desarrollo de tales filtros selectivos ha sido muy rápido en los últimos años, debido a la capacidad de obtener haces de protones (y electrones) de energía intermedia de alta calidad.

La energía que emplean los proyectiles es de 100 a 400 M*e*V ya que la interacción NN es más débil en este rango, lo cual logra que sea más probable que el nucleón proyectil sólo interaccione principalmente con un único nucleón blanco. Además, las modificaciones a la fuerza NN inducidas por otros nucleones no son tan grandes a energías intermedias, simplificando, por tanto, la interpretación de los datos. A veces, puede obtenerse información adicional sobre el estado nucleón-blanco a partir de la difusión inelástica de neutrones o a partir de otros procesos nucleares, tales como la desintegración beta.

Pueden llevarse a cabo experimentos complementarios de dispersión inelástica de electrones y protones con una resolución final de la energía (menor que una parte en mil) para un cierto número de núcleos. Los resultados han demostrado la posibilidad real de alcanzar una comprensión microscópica cuantitativa de las colisiones nucleón-nucleón. La densidad de los nucleones vecinos puede tener un efecto especialmente importante en la parte de la interacción NN que es independiente del spin o del isospín. Todavía restan algunas pequeñas discrepancias entre la teoría y los experimentos en el estudio de las interacciones independientes del spin, pero su relación con los defectos conocidos de la teoría nuclear no está todavía clara.

La parte dependiente del spin en la interacción NN es objeto de un gran interés teórico y experimental. Un ejemplo de cómo las reacciones inducidas por nucleones pueden actuar como filtro selectivo, lo proporciona la reacción de intercambio de carga protón/carbono-14 antes que cambie el isospín de un neutrón blanco, convirtiéndolo en un protón. Si la reacción no cambia simultáneamente el spin, el nitrógeno-14 se mantiene en un estado excitado con el mismo spin que el núcleo blanco. Si, no obstante, la reacción también cambia el spin del neutrón (ésta es la transición de Gamow-Teller anteriormente descrita), el núcleo queda en un estado excitado

todavía más elevado. Los resultados experimentales muestran que, a medida que aumenta la energía de la colisión, desde 60 a 200 M*e*V, la reacción de cambio de isospín (sin cambio de spin) disminuye en importancia mientras que la reacción de Gamow-Teller aumenta; esto implica diferentes dependencias energéticas para las partes dependientes e independientes del spin de la interacción NN. La fuerza NN entre nucleones libres despliega un comportamiento similar en las intensidades relativas, pero las predicciones basadas en ellas no están de acuerdo cuantitativamente con estos experimentos; el ambiente nuclear puede modificar fuertemente el proceso de intercambio de piones, tal como han sugerido diversos cálculos.

Hasta la fecha los resultados han demostrado que las transiciones inducidas por nucleones para energías de colisión intermedias pueden actuar realmente como un filtro selectivo para varios componentes de la fuerza nucleón-nucleón en los núcleos. Es probable que este programa adquiera un valor real en el futuro, con una mayor aplicación sistemática de las técnicas de tratamiento de la interacción de muchos cuerpos a una amplia variedad de reacciones, excitaciones nucleares, energías de colisión y propiedades medidas (especialmente observables que dependen del spin).

Generalización de la teoría tradicional de la interacción de muchos cuerpos

La teoría nuclear únicamente considera en sus estudios nucleones no relativistas, carentes de estructura, que interactúan a través de fuerzas entre dos cuerpos. Las persistentes discrepancias entre los cálculos y los experimentos son ampliamente atribuidas a las excesivas simplificaciones de la teoría tradicional, por lo que se han llevado a cabo serios estudios para mejorar dicha teoría mediante la inclusión de algunos de los más modernos conocimientos de las interacciones fuertes.

El objetivo principal de este esfuerzo consiste en incorporar matemáticamente los efectos producidos por todos los hadrones del núcleo y no sólo protones y neutrones, aproximación que podría denominarse hadrodinámica cuántica (QHD). (Los hadrones interactúan a través de la fuerza fuerte e incluyen a todos los bariones y todos los mesones.) Si la fuerza

electromagnética entre partículas cargadas puede ser imaginada como debida al intercambio de fotones virtuales, la fuerza fuerte entre hadrones puede ser considerada como el resultado del intercambio de mesones virtuales (los cuales a su vez son hadrones). Los piones son los mesones de menor masa, y puesto que la masa de la partícula virtual está inversamente relacionada con el alcance de la fuerza, el intercambio de un pión es responsable de la componente de mayor alcance de la fuerza nuclear. La componente de corto alcance se debe al intercambio de varios piones y de mesones más pesados, tales como los sigma, rho y omega.

La existencia de resonancias bariónicas en el núcleo hace que se considere la posibilidad de nuevos fenómenos omitidos en la teoría tradicional. Por ejemplo, un nucleón podría excitar a un segundo nucleón hasta un estado delta, y el delta podría interactuar con un tercer nucleón. El uso de estas tres fuerzas entre tres cuerpos podría permitir a los teóricos eliminar las discrepancias que habitualmente existen entre los experimentos y teorías de sistemas de tres nucleones y de la materia nuclear. Asimismo, se ha utilizado esta explicación en uno de los intentos de interpretar la inesperada depresión en la región central de la distribución de carga del núcleo de helio-3 deducida a partir de las medidas de difusión de electrones. Sin embargo, las fuerzas entre tres cuerpos no han sido incorporadas todavía en los cálculos de muchos cuerpos, y sus efectos tampoco han sido claramente identificados de manera experimental.

Una teoría cuántica de campos de las interacciones hadrónicas en los núcleos combina relatividad y mecánica cuántica. Estas son las características esenciales de cualquier extrapolación fiable de las propiedades de la teoría nuclear bajo condiciones extremas de temperatura (energía nuclear promedio) y densidad. Una ventaja de las teorías relativistas es que las interacciones de spin están presentes de forma natural en las ecuaciones fundamentales y no necesitan la inclusión de términos adicionales. Tales teorías también predicen que la masa aparente de un nucleón en un núcleo queda alterada, lo cual posiblemente influye de forma significativa sobre el origen de las fuerzas repulsivas que impiden el colapso del núcleo. Aunque todavía existen pocos experimentos o cálculos que incorporen una teoría de campos completamente relativista de las interacciones hadrónicas en los núcleos, la descripción de los núcleos en términos de este campo puede ser un objetivo de gran importancia en el futuro. Un intento reciente de construcción de una teoría de campos mesón-barión se basa en sólo

unos cuantos mesones (pi, rho, sigma y omega) y en unos pocos bariones (protón, neutrón), pero ya ha obtenido un éxito considerable en el tratamiento de la estructura nuclear y de las reacciones nucleón-nucleón.

Aunque los mesones y bariones proporcionan un lenguaje eficaz y ordenado para describir buena parte de la estructura nuclear, se sabe que están compuestos, a su vez, por quarks y gluones, cuyo comportamiento está descrito por la cromodinámica cuántica (QCD). En último término, la QCD debe reproducir las conocidas corrientes de intercambio de mesones entre dos bariones cualesquiera durante grandes separaciones internucleares. Los puntos clave para comprender el problema nuclear de muchos cuerpos consisten en identificar sin ambigüedades la contribución de los quarks y colores en la descripción de los sistemas nucleares y los esquemas hadrodinámicos cuánticos de la estructura nuclear, así como desarrollar una descripción de los núcleos dentro del marco de la cromodinámica cuántica.

3. Fuerzas fundamentales en el núcleo

Desde el inicio de los estudios de la física nuclear hasta nuestros días, los investigadores han obtenido un considerable éxito en la explicación de las propiedades cuantitativas de los núcleos, indicando su composición a partir únicamente de protones y neutrones. Los efectos de los demás componentes del núcleo, tales como los mesones virtuales, están presentes a través de las interacciones fuertes de los nucleones. Sin embargo, los mesones y otros componentes fundamentales no suelen aparecer durante las pruebas experimentales, produciendo una situación análoga a la de los electrones internos en el enlace de los átomos. Los electrones internos afectan a las fuerzas de enlace pero pueden ser ignorados en gran medida durante la descripción del enlace químico. De la misma manera, los nucleones son considerados como objetos compuestos por quarks, que sólo unos cuantos tipos de experimentos adecuados pueden revelar su estructura.

Los experimentos que miden las propiedades electromagnéticas de los núcleos son particularmente reveladores. Muchos de los componentes de los núcleos están cargados y producen, por lo tanto, corrientes electromagnéticas medibles. Otro tipo de experimento consiste en medir las violaciones de simetría en las transiciones nucleares, ya que los estados poseen simetrías que son fáciles de clasificar y medir, y cualquiera de las violaciones puede ser atribuida a las partículas fundamentales que transmiten las fuerzas nucleares. En los dos apartados siguientes se describirán con más detalle algunos estudios que conectan las propiedades nucleares con las partículas fundamentales y sus interacciones.

COMPONENTES NO NUCLEÓNICOS DEL NÚCLEO

El hadrón más ligero, el pión, tiene un papel prominente tanto en física nuclear como en física de partículas elementales. En física nuclear, la interacción fuerte se transmite a través de grandes distancias internucleónicas gracias a los piones virtuales. Los piones virtuales cargados que se

encuentran en el núcleo delatan su presencia debido a los efectos magnéticos de sus corrientes. No obstante, los aspectos piónicos de los estados nucleares también pueden ser estudiados de otras maneras, tales como la difusión de nucleones de alta energía por los núcleos. Por otro lado, en una colisión rasante, el nucleón proyectil prácticamente no perturba el blanco excepto por el fugaz efecto de la nube piónica del proyectil, así como por los efectos de otras fuerzas. Las medidas de absorción y difusión de piones por los núcleos han proporcionado información sobre las interacciones hadrónicas, fundamentando la idea de que las simetrías propias de la física de quarks también se aplican a los piones del medio nuclear.

El descubrimiento de que los nucleones contienen mesones virtuales sugiere que también pueden contener otro tipo de partículas. Para complicar todavía más esta brusca separación del sencillo modelo protón-neutrón del núcleo, se admite en la actualidad que los mesones y los nucleones son, a su vez, objetos compuestos por quarks. Los quarks que forman un nucleón interactúan fuertemente intercambiando gluones entre sí, mientras se mantienen fuertemente ligados en el nucleón y tienen un espectro de estados energéticos similar al de los electrones ligados a un átomo. Desde este punto de vista, un núcleo dado es solamente un posible estado de los quarks; otros estados excitados corresponden a miembros más masivos, no nucleónicos, de la familia bariónica, de manera que el nucleón cambia a otro tipo de barión cuando los quarks cambian de estado. Al cabo de cincuenta años del descubrimiento del neutrón, la imagen del núcleo ha cambiado desde un simple agregado de protones y neutrones (bolas de billar) a una bulliciosa masa de nucleones, bariones y mesones, todos ellos formados por quarks.

Es natural preguntarse si los nuevos rasgos no nucleónicos del modelo actual de núcleo poseen consecuencias tangibles. El éxito del modelo de protones y neutrones del núcleo a energías bajas y moderadas implica que las contribuciones no nucleónicas deben buscarse en las regiones de alta energía o en interacciones diferentes de la nucleón-nucleón tan utilizadas en el pasado. En los últimos años, los investigadores del tema han sondeado los efectos no nucleónicos en los núcleos dirigiéndose hacia energías cada vez más altas y creando, deliberadamente, componentes no nucleónicos en el núcleo, así como estudiando directamente las interacciones de partículas más exóticas.

Como ya se sabe, un objeto es difícil de ver a menos que la longitud de onda de la luz sea más pequeña que las dimensiones del objeto; esta propiedad ondulatoria fundamental limita, por ejemplo, el aumento útil de los microscopios. Uno de los aspectos más extraños de la mecánica cuántica (también denominada mecánica ondulatoria) consiste en que cualquier partícula de dimensiones atómicas o aún más pequeña exhiba un comportamiento de tipo corpuscular y ondulatorio a la vez, y cuya longitud de onda sea inversamente proporcional al momento de las partículas. Por lo tanto, la exploración de las pequeñas estructuras del núcleo requiere un partícula sonda cuyo elevado momento (y elevada energía) proporcione una longitud de onda lo suficientemente pequeña como para distinguir claramente las estructuras internas. Los electrones de alta energía constituyen una buena elección para este tipo de experimentos, ya que interactúan con los núcleos a través de la fuerza electromagnética y porque parecen ser partículas puntuales carentes de dimensión o estructura interna.

Otro experimento consiste en la implantación en un núcleo de impurezas bariónicas no nucleónicas que permita estudiar la respuesta subsiguiente del sistema. Utilizando técnicas experimentales avanzadas, se puede reemplazar un nucleón individual en un núcleo por un lambda extraño o un hiperón sigma (un barión que difiere de los nucleones porque posee un quark extraño en lugar de quarks arriba o abajo) sin perturbar prácticamente las órbitas de los nucleones. El resultado es un *hipernúcleo,* en el cual la interacción nucleón-nucleón es reemplazada por la ligeramente distinta hiperón-nucleón. Puesto que los movimientos internos en el hipernúcleo están fuertemente relacionados con los movimientos conocidos del núcleo original, se pueden deducir las propiedades de las interacciones nucleón-hiperón a partir de las medidas de la estructura hipernuclear.

Un nuevo tipo de experimento que todavía está siendo desarrollado utiliza colisiones protón-antiprotón a energías moderadas para salvar el hueco existente entre la física nuclear y la física de partículas. Por otro lado, los sistemas protón-antiprotón representan una interacción familiar medida por el intercambio de mesones, pero desde el punto de vista del modelo de los quarks, se trata de un sistema formado por tres quarks y tres antiquarks cuyas interacciones se realizan a través del intercambio de gluones. Estos experimentos deberían poner a prueba tanto las teorías de intercambio de mesones como los modelos de quarks.

Los tres tipos de experimentos señalados aquí se detallan a continuación con el objeto de mostrar la información que pueden proporcionar y las excitantes sorpresas que ha provocado su uso.

Sondeo de la estructura de quarks mediante leptones

Los leptones —electrones, muones, tauones y sus neutrinos correspondientes— interactúan con los nucleones a través de la fuerza electrodébil en lugar de la fuerza fuerte. Por lo tanto, un leptón que interactúa con un núcleo no ejerce una fuerza suficiente sobre los nucleones para perturbar significativamente sus movimientos internos, incluso cuando el leptón pasa directamente a través de la materia nuclear. Los leptones son, por lo tanto, excelentes sondas para observar a los núcleos en su estado natural. Además, puesto que la fuerza electromagnética es bien conocida, la dispersión de los leptones por los núcleos puede relacionarse con las propiedades de los difusores sin temor a cometer faltas.

La difusión de electrones de alta energía por los núcleos ha sido el método más eficaz para proporcionar información detallada sobre la distribución de carga eléctrica, y también de magnetismo, en los núcleos. Sin embargo, esta carga no reside únicamente en los protones, ya que muchos de los mesones virtuales que existen momentáneamente en un núcleo están cargados eléctricamente e incluso los neutrones y mesones neutros pueden ejercer fuerzas magnéticas. Las técnicas de difusión de electrones de alta energía constituyen por lo tanto una herramienta natural en la búsqueda de los efectos ejercidos por estos componentes mesónicos.

Se necesitan energías de bombardeo relativamente elevadas (en el rango del G*e*V) para que la longitud de onda del electrón sea lo suficientemente corta como para apreciar los detalles del interior del núcleo. Los resultados experimentales de la difusión de electrones de alta energía por núcleos ligeros de helio-3 no pueden explicarse satisfactoriamente utilizando modelos teóricos que sólo tienen en cuenta los efectos de la carga y el magnetismo de los dos protones y el neutrón; también deben incluirse los efectos electromagnéticos que surgen del intercambio de un pión o un mesón rho entre los nucleones. El *modelo de intercambio de mesones* explica de forma mucho más completa los datos (v. fig. 3-1), lo que ha dado

lugar a resultados que han creado un intenso interés científico. El Acelerador Continuo de Electrones de 4 G*e*V (CEBAF), cuya construcción ha sido propuesta por la Asociación de Investigación de las Universidades del Sureste (Southeastern Universities Research Association: SUR A), permitiría una gran mejora en la investigación de la contribución de los intercambios de mesones en los experimentos del tipo mencionado anteriormente.

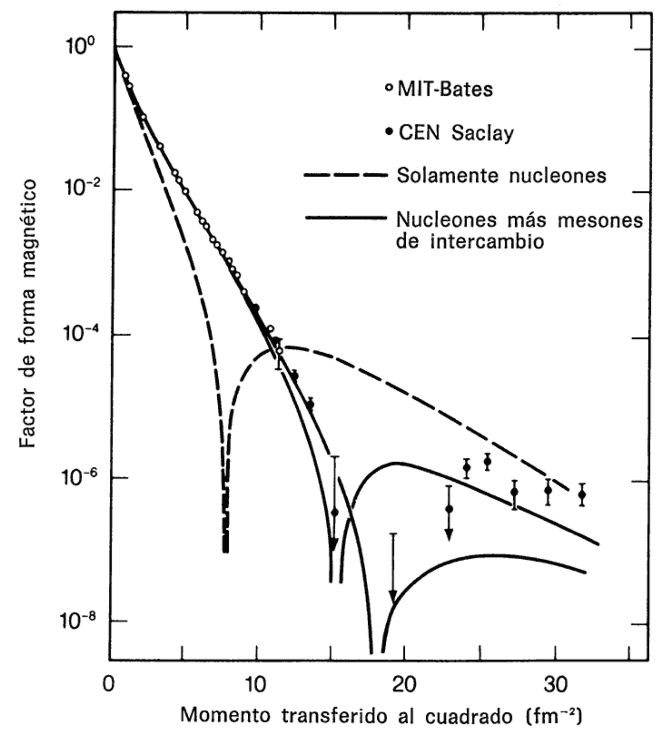


Fig. 3-1. Los datos obtenidos mediante la dispersión de electrones de alta energía y mediante núcleos de helio-3 revelan la superioridad del modelo de intercambio de mesones a la hora de describir la distribución de magnetismo en los núcleos, si se compara con el modelo que sólo tiene en cuenta los nucleones. Todas las curvas representan cálculos teóricos; las dos de trazo continuo se basan en hipótesis algo diferentes. (J. M. Cavedon et al., Physical Review Letters 49, 986 [1982].)

Los electrones, muones y neutrinos han sido utilizados para investigar la estructura de los quarks en los hadrones (bariones y mesones). El método usual para estudiar nuevas partículas —bombardear un blanco con energía suficiente para crear o desprender la partícula deseada— no se aplica en este caso aquí. Esto es debido al fenómeno del *confinamiento de los quarks,* que demuestra que es aparentemente imposible liberar a los quarks de sus hadrones con los medios de que se dispone.

Para describir esta situación única, los modelos se basan en la hipótesis de que los quarks que forman un hadrón están confinados en una *bolsa* impenetrable o bien ligados por *muelles* irrompibles, de manera que no pueden escapar. Este aspecto del comportamiento de los quarks se basa en una característica sorprendente de la intensidad de su interacción de color: es aproximadamente cero cuando están muy cerca unos de otros (una condición denominada *libertad asintótica)* y crece en un alto grado cuando se alejan. Se trata justamente del comportamiento opuesto al de las interacciones gravitatoria, electromagnética y fuerte entre hadrones, todas las cuales se debilitan a medida que las partículas se van alejando. El tamaño de la bolsa de los quarks (es decir, el tamaño de un hadrón) representa el límite más allá del cual los quarks no pueden separarse.

El modelo estándar de quarks fue desarrollado con el objeto de explicar de forma concisa la gran variedad de hadrones conocidos. El modelo requiere que los quarks posean spin ½ de manera que puedan combinarse adecuadamente para proporcionar los spins observados de los hadrones. Los experimentos de dispersión de electrones y muones han proporcionado resultados importantes a partir de estos requisitos que utilizan el magnetismo inherente que poseen las partículas con spin. La comparación entre la fracción de proyectiles difundidos a través de ángulos pequeños y grandes permite eliminar el efecto de las fuerzas eléctricas, respetando únicamente la dispersión debida al magnetismo. Los efectos magnéticos aplicados a las energías cuyo modelo teórico es más exacto, son coherentes y participan de la idea de que los difusores son partículas puntuales (los quarks) de spin ½.

El modelo estándar de quarks también supone que éstos poseen carga eléctrica fraccionaria (comparada con la unidad de carga del electrón), para conseguir que la carga neta de una combinación dada de quarks sea igual a la carga observada de los hadrones a que dan lugar. La existencia de una carga eléctrica fraccionaria libre jamás ha sido demostrada de

forma convincente en ningún objeto macroscópico; cosa que se explica sobre la base del confinamiento de los quarks. Sin embargo, la difusión de electrones por el hidrógeno y el deuterio en el acelerador lineal de Stanford y la difusión de neutrinos por un hidrocarburo fluorado en el CERN de Ginebra han proporcionado resultados afines a los predichos anteriormente en torno al modelo de quarks basado en partículas puntuales que poseen cargas –⅓ y +⅔ (en unidades de carga electrónica). Por lo tanto, tomados de modo global, los experimentos de dispersión de electrones representan un fuerte apoyo al modelo de quarks.

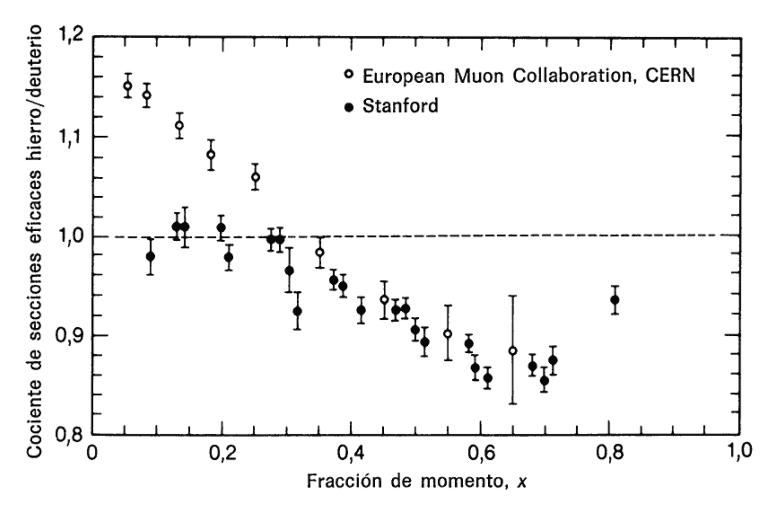


Fig. 3-2. Tal como se explica en el texto, los datos procedentes de la dispersión inelástica de muones y electrones de alta energía pueden interpretarse siguiendo la idea de que la distribución de los quarks en el interior de los núcleos de hierro es sustancialmente diferente. Si no fuera así, los puntos caerían sobre la recta a trazos. (Nuevos datos electrónicos por cortesía de R. G. Arnold, Universidad Americana, Washington D.C.)

Los núcleos proporcionan el único sistema existente para buscar estados multiquark complejos. El encuentro de estos estados resultaría de gran interés para el desarrollo de la comprensión sobre el confinamiento de los quarks. La Colaboración Europea sobre Muones (European Muon Collaboration) en el CERN ha obtenido interesantes resultados en las colisiones

de muones con blancos de deuterio o hierro. Los experimentos se han interpretado como indicativos de que la distribución de quarks en el núcleo de hierro es ligera, pero significativamente diferente de la correspondiente a un nucleón aislado (v. fig. 3-2). (El deuterón está tan poco ligado que puede considerarse formado por dos nucleones libres.)

Algunas de las posibles explicaciones que se han emitido se basan en la hipótesis de que los quarks están confinados menos fuertemente en el medio nuclear. Los nucleones podrían expansionarse como consecuencia de sus interacciones mutuas, o los quarks podrían «percolar» de un nucleón a otro. Una explicación alternativa a esta teoría es que los quarks adicionales forman parte de los piones virtuales del núcleo y que la difusión de electrones proporciona, en efecto, una instantánea de los componentes nucleares. El progreso de estos experimentos está siendo observado de cerca por los físicos nucleares, ya que una comprensión profunda del papel que desempeñan los quarks en la estructura nuclear resultaría de gran ayuda en sus estudios.

La física de los hipernúcleos

La presencia de materia nuclear ambiental puede modificar drásticamente las propiedades de una partícula. Un neutrón libre, por ejemplo, tiene una vida media de unos 10 minutos antes de desintegrarse en un protón. Recíprocamente, las interacciones de una partícula embebida puede modificar las propiedades de la materia nuclear. La posibilidad de estudiar partículas no nucleónicas y materia nuclear en el mismo sistema ha estimulado a experimentadores y teóricos desde que se descubrió el primer hipernúcleo.

Por diversas razones, buena parte de los estudios a los que se dedica la física hipernuclear se ha concentrado en la interacción lambda-núcleo. Un hiperón lambda implantado en un núcleo no lo modifica drásticamente, ya que un lambda se parece mucho a un neutrón: tiene carga cero, su masa es un 20% mayor y posee una interacción algo más débil con los nucleones. Por lo tanto, un hipernúcleo lambda es diferente del núcleo original, pero no tan diferente como para que no pueda ser compatible. Otra propiedad útil de este hiperón es que, comparado con otras partículas inestables, po-

see una vida enormemente larga (en la escala de tiempos nucleares), concretamente de unos 10^{-10} segundos. Su vida es suficientemente larga como para que pueda estudiarse con detalle su interacción con otros nucleones.

La técnica general para construir un hipernúcleo consiste en producir el hiperón *in situ* permitiendo al proyectil adecuado que reaccione con un nucleón en el núcleo blanco. El proyectil más común es el kaón negativo, el cual es producido en los aceleradores de instituciones como el CERN (Suiza), el Laboratorio Nacional de Brookhaven y el KEK (Japón). El kaón reacciona con un neutrón para producir un lambda y un pión negativo; el pión es expulsado del sistema y proporciona la señal que indica la formación de un hipernúcleo.

Para que los experimentos fueran más perfectos, el barión no nucleónico debería ser creado prácticamente en reposo en el núcleo, para evitar depositar un pico de energía que podría alejar a los nucleones de sus órbitas o incluso del núcleo. Con la elección apropiada de los parámetros experimentales, esta condición puede obtenerse en las reacciones inducidas por kaones, por lo que los bariones así creados se mueven no mucho más deprisa que los nucleones ya presentes en el núcleo blanco. El barión permanece esencialmente en el mismo estado que el nucleón que reemplaza, estado que recibe el nombre de *estado sustitucional* del núcleo. Experimentalmente, los estados sustitucionales pueden ser estudiados programando el equipo de medida de manera que empiece a acumular datos solamente cuando se detectan los piones de la reacción moviéndose de manera casi paralela al haz de proyectiles.

Es difícil producir haces de kaones adecuados para crear estados sustitucionales con la calidad adecuada, ya que estos elementos son inestables y se generan como un haz secundario en un acelerador de protones de varios G*e*V. Los kaones producidos en la reacción inicial con los protones poseen un amplio espectro de energías y ángulos y están mezclados con una gran proporción de piones. Es necesario un gran esfuerzo antes de que los kaones puedan ser aislados para producir estados sustitucionales en los hipernúcleos. Actualmente, la investigación en torno a este tema se encuentra atascada debido a la falta de kaones que posean un abanico suficientemente estrecho de energías.

Se han producido alrededor de dos docenas de hipernúcleos lambda distintos, especialmente a partir de los elementos ligeros (incluido el oxí-

geno). El análisis de la energía de ligadura de los lambda en el estado nuclear fundamental (es decir, la cantidad de energía requerida para liberar el lambda) muestra que la parte independiente del spin de la interacción lambda-nucleón es sólo unos dos tercios tan fuerte como la interacción nucleón-nucleón, mientras que la parte que depende del spin es mucho más débil.

Si se produce un estado excitado del hipernúcleo lambda, éste puede efectuar una transición a un estado más bajo emitiendo un rayo gamma. Las medidas de los rayos gamma dan, por Jo tanto, el espaciado energético entre los estados —el mismo método utilizado habitualmente para estudiar los niveles energéticos de los núcleos ordinarios y comprobar a partir de aquí las teorías de la estructura nuclear. Los investigadores del Laboratorio Nacional de Brookhaven se han dedicado en especial a este tema y, habitualmente, efectúan experimentos con detectores de rayos gamma de alta resolución para medir las energías con una mayor precisión.

Los hipernúcleos sigma también han sido estudiados, aunque en menor medida. El sigma es un hiperón que se desintegra en un lambda, un proceso que parece ser relativamente rápido. Sin embargo, los científicos del CERN y de Brookhaven quedaron muy sorprendidos cuando recientemente descubrieron estados sustitucionales en los hipernúcleos sigma de vida relativamente larga. Los datos son escasos, y todavía no se conoce si la lenta desintegración de un sigma en un lambda en los hipernúcleos representa un efecto de inhibición especial limitado a los núcleos ligeros o una propiedad general de la materia nuclear.

Cromodinámica cuántica a bajas energías

Actualmente se cree que la cromodinámica cuántica se convertirá-en la teoría básica de la interacción fuerte. En la región de libertad asintótica, donde los quarks están cerca unos de otros e interactúan muy débilmente, los cálculos de la QCD producen resultados que concuerdan plenamente con los experimentos. A distancias mayores, sin embargo, donde los quarks confinados interactúan fuertemente, los cálculos se vuelven tan complicados que es difícil obtener resultados fiables, aunque se han conseguido progresos considerables a través de la teoría de aforo de las redes. Puesto que la región de libertad asintótica únicamente puede ser sondeada

en el laboratorio con experimentos de muy alta energía, la teoría y las altas energías han ido codo con codo en el desarrollo de la QCD. A energías más bajas, sin embargo, los experimentos efectuados hasta la fecha no parecen relacionarse con la QCD de una manera que pudiera facilitar su generalización al terreno de las interacciones fuertes de los quarks. Por lo tanto, los físicos han intentado concebir experimentos de baja energía directamente vinculados a la QCD.

Los principales candidatos para estudiar las propiedades de los quarks a energías más bajas (menos de 1 GeV) son las interacciones protón-antiprotón o protón-kaón. De acuerdo con el modelo de quarks, un protón tiene la estructura *uud* (dos quarks arriba y uno abajo). Un antiprotón tiene una estructura análoga $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ formada con antiquarks en lugar de quarks. Durante una colisión protón-antiprotón, un quark *u* puede aniquilar su antiquark $\bar{u}$ para formar, por ejemplo, el quark extraño *s* y su antiquark $\bar{s}$ (v. fig. 3-3). Después de la colisión, el sistema se separa en dos hiperones formados por tres quarks: *uds* (un lambda) y $\bar{u}\bar{d}\bar{s}$ (un antilambda). Se espera que el detallado estudio de tales procesos, sobre un amplio rango de energías, proporcione importantes datos que guíen el desarrollo de la QCD.

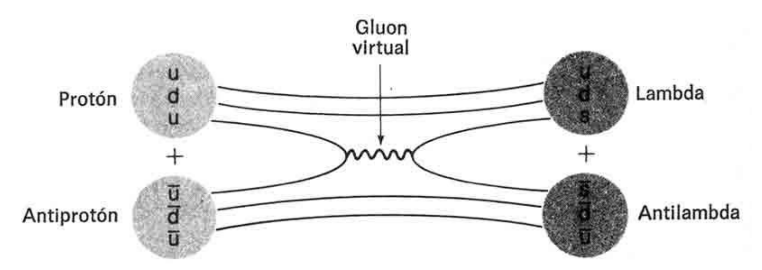


Fig. 3-3. Aniquilación de un quark y un antiquark $\bar{u}$ en una colisión proton-antiprotón. La aniquilación produce un gluon virtual de alta energía, el cual desaparece después de crear un quark *s* y un antiquark $\bar{s}$ en los respectivos núcleos, los cuales se convierten, por lo tanto, en un hiperón lambda y uno antilambda.

Los estudios de las interacciones protón-antiprotón se encuentran ya en curso en el nuevo Anillo de Antiprotones de baja energía (Low-Energy Antiproton Ring: LEAR) del CERN, un acelerador que representa la fuente casi ideal de antiprotones de baja energía. Este acelerador proporciona un haz copioso, esencialmente puro, de antiprotones sobre un amplio

rango de energías, con una dispersión energética muy baja. Aunque podría aprovecharse su capacidad adicional para producir antiprotones polarizados (spin alineado) para la investigación de las fuerzas dependientes del spin, la instalación LEAR ofrece interesantes oportunidades de investigación que lo convierten en un elemento singularmente atractivo para muchos grupos de usuarios de Estados Unidos.

EL NÚCLEO, LABORATORIO DE SIMETRÍAS FUNDAMENTALES

Buena parte de los conocimientos generales sobre la naturaleza están contenidos en las leyes de conservación y en los principios de simetría que las originan. Las leyes de conservación constituyen profundos enunciados de gran generalidad que se aplican incluso cuando se desconocen los detalles del sistema. Las clásicas leyes de conservación de la carga, de conservación de la energía y conservación del momento se aplican rutinariamente al análisis de las reacciones nucleares debido a su completa fiabilidad. Desde el punto de vista opuesto, el hecho que las leyes de conservación deducidas a partir de la física cotidiana puedan ser aplicadas a los sistemas nucleares representa una gran generalización a nuevos dominios de tamaño y energía. Asimismo, el estudio de sistemas nucleares ha revelado nuevas simetrías y leyes de conservación que no resultan evidentes en cuanto al comportamiento de los objetos macroscópicos se refiere. Puesto que la teoría impulsa el examen de la naturaleza de las fuerzas fundamentales hacia energías que están mucho más allá del alcance de los mayores aceleradores construidos por el hombre, la investigación de violaciones de simetría en el ambiente calibrado con precisión del núcleo puede ser la única aproximación válida para los sutiles efectos residuales aplicados a energías que *son* accesibles.

Existen varias razones por las cuales el núcleo es un excelente laboratorio para el estudio de las simetrías fundamentales. El núcleo muestra fácilmente los efectos de las fuerzas fuertes y electrodébiles a la vez, y su tamaño lo sitúa a sólo uno o dos escalones de lo que se cree es la estructura última de la materia. Además, el gran número de protones y neutrones accesibles ayuda a aclarar las diferencias y a distinguir entre lo general y lo específico. Las partículas extrañas, tales como el hiperón lambda, pueden

ser implantadas para formar hipernúcleos, extendiendo, por lo tanto aún más la variedad de los núcleos. Finalmente, los núcleos poseen estados cuánticos definidos, de manera que los sistemas estudiados *tienen* propiedades bien definidas. Una ventaja adicional es la gran ampliación de los efectos pequeños que puede llevarse a cabo cuando dos estados nucleares con propiedades específicas tienen aproximadamente la misma energía. Del mismo modo que la física ha avanzado cada día más hacia la elaboración de teorías comprehensivas, así ocurre con la sensibilidad experimental hacia los efectos pequeños.

La fuerza débil ha sido una fuente extraordinariamente fructuosa de información sobre las simetrías subyacentes de la materia. Esta fuerza está lista para ser estudiada adecuadamente en los más de 2.000 núcleos conocidos que sufren desintegración beta, que es sólo una manifestación de esta fuerza. La atención de los físicos en torno a este tema se reenfocó sobre la cuestión de las leyes de simetría gracias al experimento llevado a cabo en 1956 en el National Bureau of Standards. En ese caso se demostró que la desintegración beta del núcleo de spin paralelo (magnéticamente orientado) cobalto-60 no ofrecía el mismo resultado que el experimento efectuado con su imagen especular, lo que constituía un resultado realmente sorprendente para aquella época. En términos de simetría, este resultado se describe diciendo que la fuerza débil no se comporta simétricamente bajo reflexión, mientras que en términos de leyes de conservación se dice que las interacciones de la fuerza débil no conservan la paridad. Las fuerzas fuerte, electromagnética y gravitacional no parecen violar la paridad y no se sabe por qué lo hace la fuerza débil.

Si se toman los teoremas de la física clásica —colisión de bolas de billar, por ejemplo—, las leyes físicas que gobiernan la interacción de los objetos resultan ser siempre las mismas, independientemente de si se considera que el tiempo va hacia delante o hacia atrás. Esta independencia de la dirección de la fecha del tiempo es un principio de simetría denominado *invariancia frente a la inversión temporal,* que durante mucho tiempo se mantuvo como única teoría válida para todos los sistemas físicos. En 1964, sin embargo, se descubrió una violación de este principio en un proceso de desintegración en el que estaba implicada la fuerza débil. La partícula en cuestión era el mesón *K* neutro (kaón), el cual puede experimentar dos tipos de desintegración beta para producir electrones positivos (positrones)

o electrones negativos. Si la invariancia temporal fuera válida, los dos ritmos de desintegración deberían ser exactamente iguales, pero en su lugar se observó que su cociente era 1,0067.

Aunque el efecto es pequeño y tiene lugar un oscuro sistema submicroscópico, puede causar importantes implicaciones cosmológicas, ya que está relacionado con la preponderancia de la materia sobre la antimateria en el Universo conocido o la preponderancia de la radiación sobre la materia. Junto con otros casos de violaciones de principios de simetría, la invariancia frente a la inversión temporal ha establecido conexiones inesperadas entre la física nuclear y la cosmología, conectando lo inimaginablemente pequeño con lo inimaginablemente grande.

El encuentro de otros ejemplos de violación de la invariancia frente a la inversión temporal en procesos más simples que los de la desintegración del kaón resultaría de gran ayuda para la comprensión de este sorprendente fenómeno. Los teóricos han intentado, por lo tanto, predecir los efectos observables de una violación de este tipo en los nucleones y en los núcleos, como, por ejemplo, un momento dipolar eléctrico no nulo (ligera separación entre las cargas positivas y negativas internas) del neutrón. Las búsquedas de tales efectos están dando lugar a estudios extraordinariamente precisos que son un tributo al ingenio de los experimentadores.

Puesto que los principios de simetría pueden aplicarse incluso cuando se desconocen los detalles de las interacciones de un sistema, la construcción de muchas teorías empieza postulando determinadas simetrías sugeridas por los datos experimentales o por la belleza del diseño teórico. Algunas simetrías pueden ser fácilmente visualizadas, tales como las simetrías del espacio y del tiempo, las cuales constituyen la base de las leyes de conservación del momento angular, de la paridad y de la energía. Pero las simetrías también pueden ser aplicadas a cantidades abstractas tales como el concepto de isospín que funde las identidades individuales de los protones y neutrones en la identidad más general de nucleón.

Los teóricos actuales se han impuesto a sí mismos la ambiciosa tarea de implicar las fuerzas «fundamentales» de la naturaleza en una descripción global a partir de la cual pueda derivarse de forma rigurosa todo lo demás. La teoría que muestra cómo las fuerzas electromagnéticas y débiles surgen de una fuerza común *electrodébil* ha dado lugar a todo un conjunto de predicciones incluyendo la existencia del quark encantado y los recientemente descubiertos bosones W^+, W^- y Z^0. Estas tres últimas partículas

son cruciales en el estudio de la física nuclear, pues su intercambio (como partículas virtuales) se encuentra en el origen de la fuerza débil.

A pesar de estos triunfos, la nueva teoría electrodébil —a la cual, junto a la QCD, se hará referencia como el *Modelo General*— es incompleta. No explica las variaciones de paridad y de invariancia frente a la inversión temporal, no unifica la fuerza fuerte o la gravitatoria con la electrodébil y no predice, a *priori,* las intensidades relativas de las fuerzas electromagnéticas y débiles. Los teóricos siguen esforzándose en formular la *Teoría de Gran Unificación* que debería unir todas las fuerzas y que debería incluir todas las leyes de simetría y sus violaciones. Los siguientes apartados proporcionan algunos ejemplos de cómo la física nuclear posee señales indicadoras del camino hacia la gran unificación.

Bosones dextrógiros en la desintegración beta

Se han obtenido pruebas de la violación de la paridad, en su más alto grado posible, por la desintegración beta nuclear; en otras palabras, las desintegraciones de la imagen especular nunca se observan. Supongamos que el neutrino emitido en una desintegración beta pueda representarse como una mano izquierda parcialmente cerrada, con el pulgar en la dirección del movimiento del neutrino. La curvatura de los dedos representa la dirección de la rotación del análogo clásico del spin del neutrino. Si este modelo se ve a través de un espejo paralelo al pulgar, la dirección del movimiento no cambia, pero la imagen especular del spin posee sentido contrario. Las reflexiones a través del espejo cambian el lado izquierdo por el lado derecho, invirtiendo completamente la paridad. Por lo tanto, la hipótesis de que los neutrinos son estrictamente levógiros explica claramente la violación de la paridad.

El modelo general supone que los bosones W^+ y W^- son levógiros (estrictamente hablando, son sus interacciones las que lo *son)* y *que los bosones* Z^0 son parcialmente levógiros, lo que automáticamente conduce al carácter levógiro de los neutrinos. Otras teorías consideran la posibilidad más simétrica de que existan bosones *W* y *Z* levógiros y dextrógiros. Si los bosones dextrógiros fueran significativamente más masivos que los levógiros, su fuerza debería tener un alcance más corto, y los neutrinos levógi-

ros deberían ser dominantes en los experimentos. La situación es algo parecida a la fuerza electrodébil, en la cual las componentes electromagnética y débil son fundamentalmente las mismas aunque se manifiestan con distintas intensidades.

Varios experimentos distintos han demostrado que si los bosones *W* y *Z* dextrógiros existen, deben ser extremadamente masivos. Algunos de estos experimentos han buscado pequeños efectos dextrógiros en la desintegración del muon o en la desintegración beta de los núcleos de neón-19, mientras que otros infieren las propiedades de los neutrinos a partir de las medidas del spin y del movimiento de los muy fácilmente observables electrones producidos en la desintegración. Probablemente transcurra cierto tiempo antes de que puedan construirse aceleradores lo bastante grandes como para permitir la búsqueda directa de bosones dextrógiros.

La masa del neutrino

Si se pudiera alcanzar y sobrepasar a un neutrino levógiro, la dirección del movimiento de éste (pero no la dirección de su spin) parecería invertirse, de la misma forma que los coches parecen alejarse de nosotros una vez los hemos rebasado. Bastaría pues el movimiento de una persona que observara el fenómeno para convertir un neutrino levógiro en uno dextrógiro, de manera que el carácter levógiro dejaría de ser una propiedad intrínseca del neutrino. Una manera de superar esta paradoja consiste en suponer que los neutrinos se mueven a la velocidad de la luz, es decir, demasiado deprisa para que algún observador pueda alcanzarlos. La teoría de la relatividad muestra que las partículas que se mueven con la velocidad de la luz deben tener masa cero. El Modelo General sólo admite neutrinos carentes de masa, pero en muchas de las teorías de gran unificación que se han propuesto, los neutrinos electrónicos, por ejemplo, pueden poseer una masa muy pequeña, típicamente entre 10^{-8} y 1 *e*V. (A efectos de comparación hay que decir que la masa del electrón es de 511.000 *e*V.)

El problema de la masa del neutrino afecta directamente a la paridad y al carácter dextrógiro o levógiro del neutrino, y a la estructura de las Teorías de Gran Unificación. La masa del neutrino también posee importantes implicaciones en cosmología. El Universo todavía contiene tantos neutrinos formados durante la gran explosión que, incluso si tuvieran una masa

muy pequeña, su fuerza gravitatoria podría finalmente detener e invertir la expansión del Universo. Debido a que la densidad de las estrellas y galaxias observadas parece ser demasiado pequeña para conseguir esto, los neutrinos podrían aportar la «masa escondida» adicional necesaria para mantener el Universo ligado. Concretamente, los argumentos cosmológicos han establecido una cota superior de 30 *e*V a la masa del neutrino electrónico, basándose en la observación de que el Universo todavía se está expansionando.

En 1980, los científicos de la Unión Soviética informaron que los neutrinos electrónicos procedentes de la desintegración beta nuclear poseen una masa comprendida entre 15 y 50 *e*V, justo dentro del intervalo de interés para la cosmología. Su método experimental se basaba en el estudio de la desintegración beta del hidrógeno-3. El electrón y el neutrino (en este caso un antineutrino) producidos se emiten simultáneamente y comparten entre sí la energía de la desintegración existente, de manera que en desintegraciones diferentes, el electrón puede recibir cualquier energía desde cero hasta el máximo. La probabilidad de que un electrón reciba una energía particular dentro de este espectro es característica de la desintegración y se denomina *perfil* del espectro de electrones. El objetivo del experimento soviético era determinar este perfil (midiendo las energías de los electrones emitidos), ya que depende de la masa del neutrino de una forma conocida.

El experimento no es sencillo, puesto que determinados efectos sistemáticos pueden distorsionar el perfil de tal modo que mimeticen el efecto debido a la masa del neutrino. Las conclusiones de este experimento no han sido comúnmente aceptadas y, actualmente, se están efectuando versiones refinadas del mismo en Estados Unidos y otros países.

Las oscilaciones del neutrino

Una masa suspendida de un muelle es uno de los experimentos más típicos que se realizan en una clase de física. El sistema posee dos modos de oscilación: la masa puede vibrar arriba y abajo, o el sistema puede oscilar como un péndulo. Con el diseño adecuado, el sistema puede pasar alternativamente de un modo a otro, de manera que la oscilación se convierta lentamente en vibración y viceversa. Un sistema mecánico-cuántico

puede exhibir una alternancia similar de modos, una especie de «latidos», que aumentan y disminuyen, de las oscilaciones mecánico-cuánticas. En algunos casos, los latidos pueden incluso manifestarse como alternancias en la identidad de la partícula.

Aparentemente, existen tres tipos distintos de neutrinos emitidos durante las desintegraciones beta: un neutrino diferente asociado con los electrones, muones (esencialmente electrones pesados) y tauones (electrones muy pesados). El Modelo General mantiene las identidades de los neutrinos electrónicos, muónicos y tauónicos estrictamente separadas, de acuerdo con las leyes comúnmente aceptadas de conservación del número de leptones de cada familia, es decir, el número total de electrones y neutrinos electrónicos del Universo menos el número total de antielectrones (positrones) y antineutrinos electrónicos es siempre constante. Una ley similar es válida para las familias muónica y tauónica, respectivamente.

Sin embargo, las teorías de Gran Unificación indican que los neutrinos de un tipo se transforman gradualmente en los de otro tipo. Un neutrino electrónico procedente de una desintegración nuclear, por ejemplo, podría convertirse gradualmente en un neutrino muónico o tauónico a medida que sigue su camino. El ritmo de cambio depende de las diferencias de masa entre ambos tipos de neutrinos teniendo en cuenta que los que poseen la misma masa o masa cero retienen su identidad. Si se observaran experimentalmente las oscilaciones de los neutrinos se vería que al menos un tipo de neutrino posee masa no nula. Además, un cambio observado de la identidad representaría la primera violación conocida de la ley de conservación del número leptónico en cada familia. Las desintegraciones beta de los productos de fisión en un reactor nuclear producen un flujo copioso de antineutrinos, y los experimentadores de los reactores del río Savannah, Grenoble (Francia) y Gösgen (Suiza) han puesto en marcha detectores capaces de ver si el número de antineutrinos electrónicos disminuye a lo largo de su trayectoria. Los experimentos más minuciosos no han proporcionado hasta la fecha indicios de la desaparición de antineutrinos electrónicos. Asimismo, los experimentos de acelerador en el Fermilab, Brookhaven y CERN no han revelado ninguna oscilación de los neutrinos electrónicos o muónicos hacia los tauónicos.

La sensibilidad de los experimentos con reactores a las pequeñas diferencias de la masa del neutrino aumenta a medida que aumenta la longitud de la trayectoria del neutrino, es decir, pequeñas diferencias de masa hacen

que las oscilaciones sean muy lentas, de manera que los neutrinos podrían viajar grandes distancias antes de sufrir una transformación observable. La longitud de las trayectorias de los neutrinos en los experimentos efectuados hasta la fecha en los reactores es de 46 m, lo que establece un límite superior sobre las posibles oscilaciones de los neutrinos. La utilización de los neutrinos producidos por el Sol debería proporcionar trayectorias con una longitud de $1{,}5\times10^8$ km, aumentando de forma espectacular la sensibilidad de las mismas. Tal como se discute en el capítulo 5, el ritmo de cuentas en los detectores de neutrinos solares actuales es aproximadamente un cuarto del valor teórico esperado; Una solución que se ha propuesto para resolver esta discrepancia es que las oscilaciones disminuyan el número de neutrinos electrónicos que llegan a la Tierra. Sin embargo, los actuales detectores de neutrinos solamente son sensibles a una pequeña fracción de los neutrinos solares que se producen en un proceso de generación de energía secundario, de manera que se pueden producir muchas incertidumbres teóricas sobre el número esperado.

La doble desintegración beta

La energía de la desintegración de un núcleo radiactivo procede de la diferencia de masa entre el núcleo inicial y los productos finales. Existen valores precisos de la masa procedentes de métodos experimentales diversos, de manera que la energía disponible para la desintegración pueda predecirse de forma bastante fidedigna. El estudio de estos valores de la masa muestra que algunos núclidos —por ejemplo el selenio-82 y el teluro-130— son estables frente a la desintegración beta normal, que debido a consideraciones energéticas utiliza la *doble desintegración beta.* En este proceso, el núcleo que se desintegra emite simultáneamente dos electrones en lugar de uno, aumentando por lo tanto el número de protones del núcleo en 2; la doble desintegración beta debería por lo tanto cambiar el selenio en kriptón y el teluro en xenón.

En la desintegración beta ordinaria, el núcleo que se desintegra emite un electrón y un antineutrino, un proceso que conserva el número leptónico familiar, tal como se demostró anteriormente. El proceso análogo, para la doble desintegración beta, debería ser la emisión de dos electrones y de

dos antineutrinos que conservaran igualmente el número leptónico familiar. Cuanto mayor es el número de partículas que deben ser emitidas en un proceso, menor es la probabilidad de que ocurra. Puesto que en esta forma de doble desintegración beta se emiten cuatro partículas, se espera que las vidas medias de estos núcleos sean muy largas, concretamente entre 10^{20} y 10^{25} años.

Por otro lado, el proceso de doble desintegración beta podría, posiblemente, tener lugar mediante la emisión de sólo dos electrones y ningún antineutrino. Este método de desintegración carente de neutrinos debería tener una vida media menor que el método en el que se utilizan dos neutrinos, puesto que deben emitirse dos partículas en lugar de cuatro. Sin embargo, el sistema sin neutrinos se opone a la ley de conservación del número leptónico e implica la creación de dos leptones (los dos electrones) sin que estén compensados por la creación de dos antileptones (los dos antineutrinos). La observación de una doble desintegración beta en la que no intervinieran los neutrinos, implicaría una violación del número leptónico.

Deben satisfacerse ciertas condiciones, además de la violación de la conservación del número leptónico, para que la doble desintegración beta sin neutrinos pueda llevarse a cabo. El sistema carente de neutrinos se describe como un proceso en dos escalones: el núcleo que se desintegra primero emite un electrón y un antineutrino virtual, una reacción análoga a la desintegración beta común. En la segunda fase, el núcleo hijo absorbe instantáneamente el antineutrino y emite el segundo electrón. El segundo escalón es análogo a un proceso conocido excepto en que los núcleos absorben neutrinos en lugar de antineutrinos, para emitir electrones. Por lo tanto, para que pueda tener lugar la doble desintegración beta, el neutrino y el antineutrino deben ser la misma partícula, además de requerir que el neutrino virtual sea dextrógiro.

Aunque las condiciones necesarias descritas anteriormente amontonan argumentos en contra del modo carente de neutrinos, bastaría un simple ejemplo para acabar con la teoría actual. Por lo tanto, se ha invertido un esfuerzo considerable en la investigación de la doble desintegración beta con dos neutrinos, a pesar de las dificultades experimentales impuestas por las larguísimas vidas medias y consiguientes bajos ritmos de desintegración beta. Tales dificultades convierten a la simulación por computador en una valiosa herramienta de diseño (v. fig. 3-4).

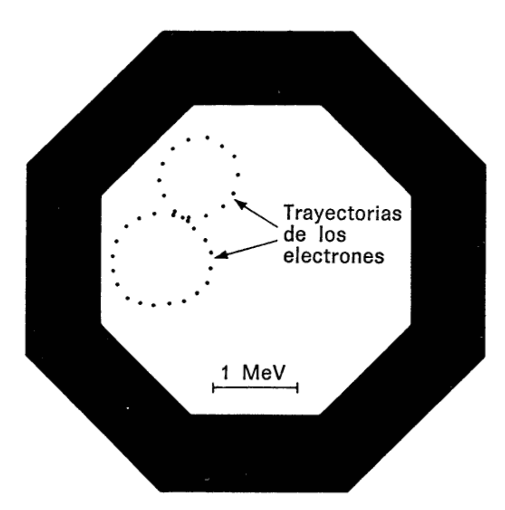


Fig. 3-4. Simulación mediante computador de una doble desintegración beta con emisión de dos neutrinos de un núcleo de selenio-82 en un detector de partículas denominado cámara de proyección temporal. En el hipotético fenómeno, el potente campo magnético del detector hace que los dos electrones se alejen del núcleo siguiendo dos trayectorias espirales diferentes. Las dos trayectorias helicoidales de los electrones generadas por el computador han sido proyectadas sobre un plano dando lugar a una figura en forma de 8. (La escala de energía proporciona el diámetro de la órbita de un electrón de 1 M*e*V emitido en el plano de la figura.) Encontrar una figura de este tipo en un experimento real podría significar la existencia de este fenómeno tan extremadamente raro. (Cortesía de M. K. Moe, Universidad de California, Irvine.)

Los rayos cósmicos dificultan la búsqueda de desintegraciones beta dobles en las que no se emiten neutrinos debido a que pueden crear efectos de fondo en el detector que oculten la verdadera señal. Por lo tanto, para aumentar la sensibilidad, los experimentos deben realizarse a grandes profundidades bajo tierra, preferiblemente bajo un grueso escudo de roca. La Unión Soviética ha construido un gran laboratorio subterráneo en Baksan para los físicos que requieren sensibilidades muy altas en experimentos como la búsqueda de la desintegración del protón, y la medida del flujo de neutrinos solares. Asimismo, se ha propuesto la construcción de una instalación similar, con los mismos fines, en el «National Underground

Science Facility», en Estados Unidos, mientras se realizan varios experimentos en profundas minas y túneles bajo montañas en Estados Unidos y Europa.

Violación de la paridad en los núcleos

De acuerdo con el Modelo General, los nucleones están formados por dos combinaciones diferentes de tres quarks arriba y abajo. En este modelo, todas las propiedades de los núcleos surgen en último término de las interacciones entre los quarks, pero sólo últimamente se han llevado a cabo los primeros intentos para relacionar las propiedades nucleares con el comportamiento de los quarks. Se cree que la interacción fuerte de los quarks (y la fuerza fuerte resultante) conserva estrictamente la paridad, pero los quarks también están sujetos a la fuerza débil, que no conserva la paridad, en la cual se intercambian bosones W^+ y W^- cargados y Z^0 neutros. El modelo de quarks predice que el intercambio de bosones cargados W^+ o W^- añadirá a la fuerza nucleón-nucleón una pequeña componente de fuerza débil que no conserve la paridad y que logre que el isospín de una pareja de nucleones interactuante no cambie o cambie en dos unidades. El intercambio de un Z^0 neutro da lugar a la aparición de una componente de la fuerza débil que tampoco conserva la paridad y que provoca un cambio en cero, en decir, una o dos unidades del isospín de una pareja de nucleones. Entre los núcleos conocidos existe una gran variedad de estados con diferentes paridades e isospíns, por lo que una cuidadosa selección de los núcleos que se utilizan como test debería permitir distinguir las dos componentes de la fuerza débil (las que proceden del intercambio de un W o un Z).

La fuerza fuerte en los núcleos conserva la paridad, de manera que a cada estado nuclear se le puede asignar un valor definido de la paridad (par o impar). Sin embargo, las fuerzas débiles mezclan las paridades de dos estados, de manera que en realidad no son ni completamente pares ni completamente impares. Los núcleos de flúor-19 y neón-21 exhiben la favorable circunstancia de tener dos niveles de energía muy cercanos del mismo momento angular pero paridad opuesta; esta gran proximidad incrementa los efectos normalmente diminutos de la fuerza débil en el proceso de mezcla de estos estados. Además, los isospíns de los estados en cuestión son

tales que, tanto en el intercambio de bosones neutros, como cargados, son capaces de influir en la mezcla de flúor-9 y neón-21.

Experimentalmente se observa una mezcla que no conserva la paridad en el flúor-19, en el cual las componentes neutras y cargadas se suman. Sin embargo, este efecto no se ve en el neón-21, en el que las componentes neutras y cargadas tienden a cancelarse.

Sensibilidades más altas deberían permitir medir la contribución de la componente puramente neutra en un núcleo vecino, el flúor-18. La comparación de los resultados experimentales con la teoría permite esbozar dos conclusiones importantes. Primero, el intercambio de bosones Z^0 entre nucleones existe realmente (el bosón Z^0 se ha detectado recientemente como partícula libre). Segundo, las masas dinámicas de los quarks arriba y abajo presentes en un nucleón están muy cerca de los valores predichos en un principio.

4. Núcleos bajo condiciones extremas

A medida que ha avanzado la tecnología de los aceleradores también lo ha hecho la capacidad de producir núcleos bajo condiciones muy poco usuales. Esto se ha traducido en el descubrimiento de interesantes fenómenos nuevos, lo cual proporciona una perspectiva más amplia sobre las propiedades de los núcleos bajo condiciones más normales. Se están utilizando en gran medida proyectiles cada vez más pesados, acelerados hasta energías medias y relativistas que, en colisiones con otros núcleos, permiten llevar a la materia nuclear hasta altas temperaturas y densidades para crear nuevos elementos e isótopos exóticos así como para producir sistemas nucleares fuertemente excitados y deformados.

Algunos fragmentos de proyectil que se forman en las colisiones nucleares relativistas exhiben un comportamiento completamente inesperado que no está del todo explicado en la teoría habitual. Estos fragmentos, denominados *anomalones*, fueron vistos por primera vez esporádicamente en los experimentos con rayos cósmicos, pero recientemente también se ha informado de su presencia en experimentos de laboratorio. Su aspecto ha desatado una viva polémica en todo el mundo, y se están haciendo vigorosos esfuerzos para demostrar —o desmentir— que son lo que parecen ser.

Cuando se disponga de proyectiles con energía muy alta, será posible crear un estado de la materia nuclear con una temperatura y una densidad tan elevada que podrá convertirse en un *plasma de quarks* y *gluones*. En este estado exótico de la materia, los nucleones dejarán de existir y las condiciones serán muy similares a las que había muy poco después de la gran explosión. En esta sección se discuten investigaciones recientes que conducen hacia este ambicioso objetivo.

NÚCLEOS A ALTA TEMPERATURA Y DENSIDAD

Una parte de la materia nuclear que existe en el Universo es mucho más densa y caliente que los núcleos relativamente fríos de la Tierra. Con el objeto de comprender el origen y la evolución de objetos celestes tan

espectaculares como las supernovas o las estrellas de neutrones, es necesario producir temperaturas y densidades nucleares comparables a las suyas. Para ello, en el laboratorio, se necesita depositar instantáneamente una enorme cantidad de energía (a la escala submicroscópica de los núcleos) en un volumen mucho mayor que el de un nucleón. Tal como se verá más adelante, esto requiere violentas colisiones de iones muy pesados en potentes aceleradores.

Hasta hace pocos años, no podían producirse este tipo de colisiones de forma sistemática ya que, aunque se habían observado indicios de iones pesados en los experimentos con rayos cósmicos, estos eventos eran raros e incontrolables. En 1974, el acelerador Bevalac del Lawrence Berkeley Laboratory fue capaz de acelerar núcleos tan pesados como los del hierro hasta energías tan altas como 2,1 G*e*V por nucleón. Este éxito marcó el comienzo de un programa de investigación con aceleradores dedicado a la *física de los iones pesados relativistas,* en los cuales un proyectil masivo (ion pesado) es acelerado hasta una velocidad tan próxima a la de la luz que su energía cinética es comparable o mayor que su propia energía en reposo. A energías tan enormes, los efectos de la relatividad especial se convierten en elementos dominantes en el proceso y deben ser tomados en cuenta al interpretar los resultados experimentales.

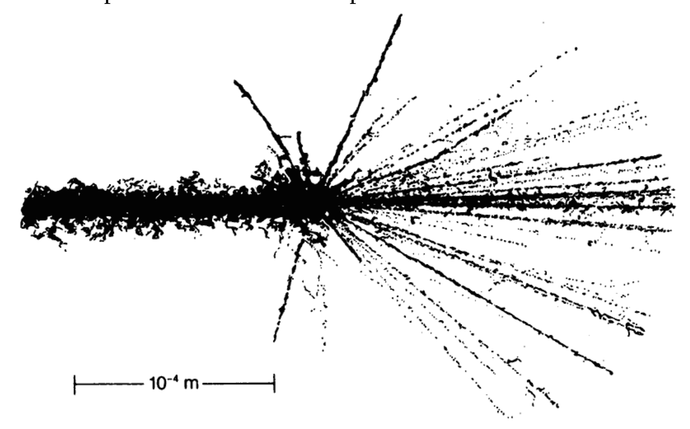
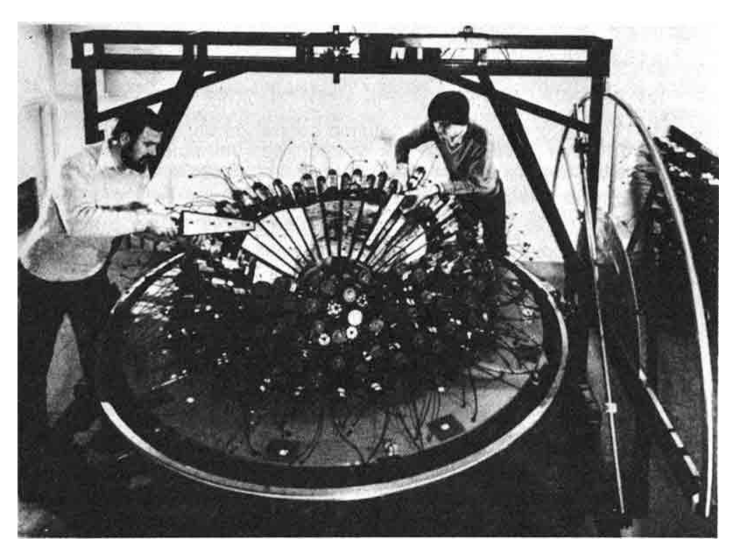


Fig. 4-1. Microproyección de la colisión central de un núcleo relativista de uranio-238, que poseía 1 G*e*V por nucleón, con un núcleo pesado (bien plata, bien bromo) en una emulsión fotográfica. En este fenómeno, los dos núcleos quedaron completamente destruidos. (Cortesía de H. H. Heckman, Lawrence Berkeley Laboratory.)

En 1982, el Bevalac realizó mejoras para acelerar todo tipo de elementos naturales de la tabla periódica hasta obtener energías relativistas, culminando con uranio acelerado a 1 G*e*V por nucleón (v. fig. 4-1). Por lo tanto, pueden alcanzarse —durante breves instantes— temperaturas y densidades que exceden con mucho a las que existen en las estrellas.

Temperaturas nucleares elevadas

El concepto de temperatura lleva implícito la hipótesis de un sistema de partículas en un estado de equilibrio, incluso aunque sea durante un período de tiempo muy corto, tal como 10^{-22} segundos (la duración típica de una colisión nuclear). En una colisión central (frontal) de dos núcleos pesados que poseen energías relativistas, se crea una *bola de fuego* nuclear en la que tienen lugar de forma muy rápida centenares de colisiones individuales nucleón- nucleón antes que las partículas producidas sean expulsadas en todas direcciones. (Esta bola de fuego es tan infinitesimal, que si explotara ante el ojo humano, aparecería como una cabeza de alfiler de luz.) La naturaleza estadística de todo el proceso sugiere el análisis de este proceso por medio de la *termodinámica nuclear*.



◄ **Fig. 4-2.** Un hemisferio del detector «Plastic Ball» (Bola de Plástico) durante su montaje. Está formado por 815 detectores modulares de centelleo de forma piramidal, cada uno con su propio sistema electrónico. El detector completo cubre el 96% del ángulo sólido total dentro del cual se emiten los productos de la reacción. (Cortesía de la Colaboración GSI/LBL, Lawrence Berkeley Laboratory.)

Una consecuencia del equilibrio termodinámico de tales sistemas sería la distribución uniforme (la misma en todas las direcciones) del momento de las partículas emitidas. Para comprobar esta idea, se necesita un detector capaz de identificar simultáneamente centenares de partículas —hadrones cargados y fragmentos ligeros de núcleos— para todos los posibles ángulos de emisión. Un detector de estas características, el «Plastic Ball/Plastic Wall», ha sido construido por un equipo del laboratorio GSI (Darmstadt, Alemania Occidental) y el Lawrence Berkeley Laboratory (v. fig. 4-2).

Con este detector se han efectuado investigaciones de colisiones de haces de calcio con blancos de calcio y haces de niobio con blancos de niobio, ambos a la energía de 0,4 G*e*V por nucleón. Los momentos medidos de todas las partículas observadas eran transformados matemáticamente desde el sistema de referencia del laboratorio (en el cual se realizan los experimentos) al sistema de centro de masas (en el cual el análisis de los datos es más fácil) y, a continuación, se calculaba y dibujaba la distribución de momentos. La distribución angular marcadamente no uniforme del relativamente ligero sistema del calcio mostró claramente que no se había alcanzado completamente el equilibrio termodinámico —ni tan sólo en las colisiones centrales, donde existía una mayor multiplicidad de partículas emitidas. Por el contrario, la mayor uniformidad de la distribución angular del sistema más pesado del niobio indicó una aproximación mucho mayor al equilibrio. Esto demuestra la necesidad de utilizar proyectiles y blancos lo más pesados posible en las colisiones nucleares relativistas. Para que los análisis termodinámicos sean válidos —y por lo tanto puedan realizarse estimaciones reales de la temperatura— es necesario producir, dentro de cada explosión, tantas colisiones nucleón-nucleón como sean posibles.

Los resultados experimentales y teóricos indican que las colisiones nucleares centrales a energías de 1 a 2 G*e*V por nucleón producen realmente una «bola de fuego» de una temperatura de alrededor de 100 M*e*V, o sea 10^{12} °K, que es 60.000 veces más caliente que en el centro del Sol. Buena parte de la energía cinética de la colisión se convierte directamente en

masa, en forma de partículas creadas, tales como kaones y piones, cuyas energías cinéticas reflejan la temperatura de la bola de fuego. Se ha observado que los kaones emitidos por la bola de fuego están apreciablemente más calientes que los protones, los cuales a su vez están más calientes que los piones. Este sorprendente resultado indica que los kaones reflejan la temperatura de la bola de fuego en una fase más temprana y caliente de su evolución, mientras que los piones reflejan la de la fase final, es decir, la de «congelamiento». Por lo tanto, podría ocurrir que los diferentes tipos de partículas producidas en la colisión sirvieran como «relojes» naturales que registrasen el fenómeno.

Densidades nucleares elevadas

Es muy difícil medir la densidad nuclear a partir de unas bolas de fuego que duran unos 10^{-23} segundos. En primer lugar, su masa media no se conoce con precisión (aunque puede ser estimada) debido a que ninguna de las colisiones que las producen son enteramente centrales. Muchas colisiones tienen lugar lo suficientemente lejos del centro como para que algunos de los nucleones del proyectil y del blanco no participen en la formación de la bola de fuego, es decir, son simples espectadores (v. fig. 4-3). Por otro lado, tampoco se conoce el volumen dentro del que se encuentran comprimidos los núcleos debido a la energía de la colisión. Sorprendentemente, se ha encontrado una manera indirecta de medir este volumen infinitesimal gracias a una técnica que se ha tomado prestada de la ciencia que trabaja con los mayores tamaños imaginables: la astronomía.

Esta técnica, denominada *interferometría de intensidades,* fue desarrollada en 1956 para medir los tamaños de las galaxias, pero puede ser aplicada en física nuclear para medir tamaños de las bolas de fuego formadas durante las colisiones nucleares relativistas. Estos eventos producen muchas parejas de partículas idénticas, tales como protones o piones positivos o negativos. A partir de las medidas de tales parejas de partículas, se determinan correlaciones que dependen de las propiedades espaciales y temporales de la fuerza. Los resultados de tales correlaciones indican tamaños de la fuente de 2 a 4 fermis, lo que es típico de muchos núcleos atómicos y por lo tanto plausible.

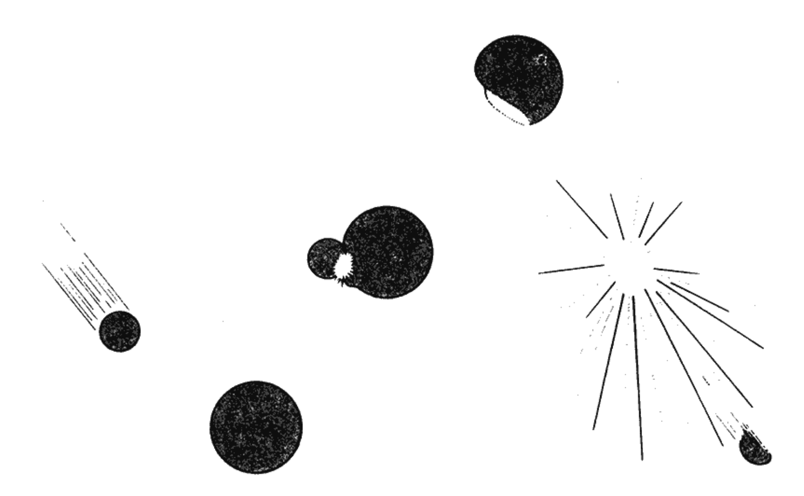


Fig. 4-3. El modelo espectador-participante de las colisiones nucleares relativistas. Las regiones participantes (que se solapan) de los dos modelos se funden para formar una densa y extremadamente caliente bola de fuego que explota en forma de un chubasco de partículas de alta energía. Mientras tanto, los fragmentos espectadores permanecen relativamente fríos, a densidad nuclear normal.

Los cálculos teóricos que usan el modelo de la *cascada intranuclear* —en el cual los núcleos son tratados como colecciones de partículas independientes que interactúan— para colisiones de argón con argón a energías de 1 a 2 G*e*V por nucleón dan densidades nucleares medias que son unas 4 veces superiores a la normal, o sea alrededor de 10^{15} gramos por centímetro cúbico. Este valor se encuentra dentro del rango de densidades que se cree existen en el núcleo de las estrellas de neutrones. Se han obtenido resultados similares a partir de modelos hidrodinámicos en los cuales el medio nuclear es tratado como un fluido. Extrapolaciones de los cálculos de cascada a sistemas nucleares más pesados predicen densidades medias 5 o 6 veces mayores que la normal.

Finalmente, si se aplican los conocimientos sobre altas temperaturas y densidades en la mano, se llega al estadio de buscar la solución a un problema muy importante, la determinación de la *ecuación de estado* de la materia nuclear.

Ecuación de estado de la materia nuclear

Las ecuaciones de estado constituyen una de las herramientas científicas más valiosas gracias a su capacidad para describir el comportamiento de un sistema físico dentro de un amplio abanico de condiciones, sobre la base de unas pocas cantidades medibles denominadas *variables de estado* (en el caso de los gases ordinarios, estas variables incluyen la presión, el volumen por molécula y la temperatura). Si se conocen todos sus valores excepto uno, para un estado dado, entonces éste puede calcularse. Para determinar una ecuación de estado, es preciso identificar las variables de estado adecuadas y medir sus valores sobre un amplio rango de condiciones.

Hasta conocer el sistema que rige las colisiones nucleares relativistas, no existía prácticamente ningún indicio experimental sobre el que basar la ecuación de estado de la materia nuclear para condiciones de alta temperatura y densidad, aunque se había realizado una gran cantidad de trabajo teórico. Sin embargo, determinados experimentos sobre la interacción de argón con argón a energías comprendidas entre 0,36 y 1,8 G*e*V por nucleón pueden constituir un paso importante hacia la comprensión de las propiedades de la materia nuclear densa y caliente. Una interpretación de las sorprendentemente bajas producciones de piones en estos experimentos es que buena parte de la energía cinética se invirtió en comprimir la materia nuclear en lugar de transformarse en piones. Cuando se combinaron estos resultados con los de los cálculos de la cascada intranuclear, se obtuvo una ecuación de estado provisional adecuada para densidades de 2 a 4 veces mayor que la normal.

Si este dato se confirma, representaría un importante avance en el campo de la física nuclear al menos por tres razones:

• Reforzaría el puente entre los modelos hidrodinámicos que se utilizan para explicar muchas observaciones experimentales y los cálculos de sistemas más detallados (pero más difíciles) de muchos cuerpos que buscan relacionar las propiedades nucleares con varios aspectos de la fuerza nuclear subyacente.

• Podría proporcionar una base de comparación para la creciente lista de ideas teóricas —como la existencia de formas extraordinarias de la materia nuclear tales como la densidad de isómeros y condensados de piones—, las cuales han constituido el estímulo más importante para el trabajo

experimental sobre colisiones nucleares relativistas durante la última década.

• Representaría un avance hacia la determinación de propiedades globales nucleares tales como la viscosidad y la conductividad térmica, las cuales son indicadores importantes de aspectos de la fuerza internucleón que permanecen ocultos. Se espera que el comportamiento de estas cantidades como funciones de la temperatura y la densidad revelen aspectos del comportamiento de las interacciones de muchos cuerpos que no son accesibles a los simples experimentos de difusión.

Con los sistemas relativamente ligeros argón-argón descritos anteriormente, la energía de compresión producida en las colisiones aumenta suavemente con la energía de bombardeo, sin que muestre ningún signo de discontinuidad que pudiera estar asociado con un nuevo estado de la materia o una transición de fase. Con un sistema nuclear muy pesado a energías relativistas muy altas, por otro lado, es muy probable que tuviera lugar una transición desde la materia hadrónica caliente hasta el *plasma quark-gluon,* que constituye el estado de la materia que se cree existió brevemente en el momento de la creación del Universo. Esta perspectiva, seguramente una de las más interesantes que jamás se hayan presentado a la física nuclear, se tratará en el capítulo 7.

LOS ELEMENTOS MÁS PESADOS

Nuevos elementos más allá del fermio

Desde el inicio del estudio de la ciencia nuclear, químicos y físicos han intentado descubrir nuevos elementos más allá del uranio (número atómico $Z = 92$). Con la llegada de los aceleradores de partículas y los reactores nucleares, se avanzó rápidamente, culminando con la síntesis del laurencio ($Z = 103$) en 1961. Durante los siguientes 13 años, el único método demostrado de sintetizar elementos transférmidos (Z mayor que 100) fue el bombardeo de blancos radiactivos más pesados que el uranio con proyectiles más pesados que el neón, para producir núcleos compuestos. Puesto que para esta investigación se necesitan aceleradores de iones pesados, los

estudios experimentales se han concentrado en el Lawrence Berkeley Laboratory, el Joint Institute for Nuclear Research (JINR) en Dubna, URSS, y más adelante en el laboratorio GSI de Darmstadt, Alemania Occidental. Aunque estas investigaciones han tenido éxito en la producción de elementos transférmidos hasta el número atómico 105, sus pequeñas productividades han ido disminuyendo al aumentar el número atómico.

En 1974, en Berkeley, se produjo y se identificó sin ambigüedades el elemento 106 mediante este método. El bombardeo del californio-249 ($Z = 98$) con oxígeno-18 ($Z = 8$) dio lugar al núclido todavía sin denominar $^{263}106$, el cual se desintegró emitiendo partículas alfa, con una vida media de 0,9 segundos, para producir más elementos que se desintegraron a su vez emitiendo partículas alfa con energías y vidas medias características. La productividad era de sólo un átomo por cada 10^{10} colisiones nucleares.

Sin embargo, por la misma época, se pudo observar en el JINR, mediante el bombardeo de un blanco algo más ligero con un proyectil mucho más pesado, plomo-208 ($Z = 82$) y cromo-54 ($Z = 24$).

Estos experimentos fueron de gran interés debido a que la energía de excitación del núcleo compuesto con 106 protones era mucho menor (el sistema era más frío) cuando se producía con un proyectil de cromo-54, de manera que tenían que emitirse menos neutrones de baja energía para estabilizar el sistema; este experimento tuvo como consecuencia un gran aumento de la productividad de este isótopo específico.

En época más reciente, el grupo de Darmstadt ha puesto a punto una nueva técnica extremadamente sensible para buscar elementos 107 e incluso más elevados, añadiendo nuevas dimensiones a estas reacciones de *fusión fría*. Ellos acoplan su selector de velocidades de retroceso de 12 m de longitud con un sistema de detección de estado sólido instalado en su foco. Este filtro, cuidadosamente sintonizado, es capaz de rechazar esencialmente todos los haces de proyectiles al tiempo que transmite un elevado porcentaje de los productos finales de la reacción al sistema de detección en tiempos del orden del microsegundo. Se utiliza una red de siete detectores fabricados con monocristales de silicio para registrar el tiempo de vuelo de un producto de la reacción, su energía, y el lugar en que se paró en la red detectora. Las subsiguientes desintegraciones alfa o fisiones espontáneas pueden ser, a continuación, correlacionadas con sus posiciones. Para una cadena hijo-nieto de desintegraciones alfa que proviene de

la implantación de un núcleo pesado, esta evidencia de correlación puede ser extremadamente potente.

A través de este impresionante sistema se descubrió que el bombardeo del bismuto-209 (Z = 83) con titanio-50 (Z = 22) producía un nuevo núclido emisor de partículas alfa, ^{207}105, el cual a su vez se desintegraba en isótopos, también emisores de partículas alfa, de los elementos 103 y 101. De forma similar, se identificó el núclido ^{258}105 junto con sus descendientes por emisión de partículas alfa o desintegración beta.

Con su trabajo completo sobre el elemento 105, el grupo de Darmstadt empezó a bombardear el bismuto-209 con cromo-54 para buscar el elemento 107. En 1981 encontraron el ^{262}107, con una vida media de 4,7 milisegundos (ms); la confirmación se obtuvo a partir de su desintegración en el elemento ^{258}105, ya conocido entonces.

El experimento más atractivo de todos los realizados en esta extensa serie fue el que parece que produjo el elemento 109, del cual se detectó *un solo átomo* en agosto de 1982. En un experimento de 12 días, el bismuto-209 fue bombardeado con hierro-58 (Z = 26) para producir una única cadena de fenómenos en uno de los cristales detectores. El único candidato para la fusión completa entre el proyectil y el núcleo blanco tenía una masa de 264± 13, calculada a partir de su trayectoria y su energía. Cinco milisegundos después de su implantación, se desintegró emitiendo una partícula alfa de 11,1 M*e*V. Al cabo de 22,3 ms se escapó una segunda partícula alfa de la zona depositando solamente 1,14 M*e*V. Finalmente, 12,9 segundos más tarde, se observó una fisión espontánea, desprendiendo una energía de 188 M*e*V. Esta secuencia de fenómenos es compatible únicamente con una serie de desintegraciones que empiezan con el núclido ^{266}109 y continúan —vía dos emisiones sucesivas de partículas alfa y una captura— hasta el núclido ^{258}104, el cual sufre una fisión espontánea. Si se corroborara, este suceso representaría la primera identificación de un nuevo elemento a través de las características de un único átomo.

En marzo de 1984 se cerró el hueco entre los elementos 107 y 109, ya que el grupo de Darmstadt presentó pruebas convincentes del descubrimiento del elemento 108, basándose en la observación de tres sucesos distintos.

La búsqueda de elementos superpesados

A mediados de la década de los 60, los cálculos teóricos que indicaban la fuerte probabilidad de la existencia de una *«isla mágica»* de elementos superpesados en la región de número de protones $Z = 114$ y número de neutrones $N = 184$ despertaron el interés de muchos científicos nucleares. Esta isla debería estar caracterizada por la relativamente elevada estabilidad asociada con las capas de nucleones completas predichas por el modelo de capas del núcleo. Los cálculos, que se basaban en extrapolaciones lógicas de los núcleos ordinarios, indicaban que algunas vidas medias podían ser lo bastante largas como para encontrar elementos superpesados en la naturaleza.

Desde entonces se han realizado muchos intentos infructuosos para encontrar tales elementos, utilizando una gran variedad de técnicas y cubriendo posibilidades en las que se incluyen minerales primordiales, meteoritos y rocas lunares. Recientemente, los esfuerzos se han enfocado hacia el uso de aceleradores de iones pesados para formar especies nucleares tan cercanas como sea posible a $N = 184$ en la región de $Z = 114$.

La manera más directa de formar elementos superpesados en los aceleradores consiste en la fusión completa de un núcleo proyectil y un núcleo blanco. Sin embargo, incluso bajo condiciones óptimas, el núcleo compuesto contiene una sustancial excitación interna (decenas de M*e*V) y momento angular, que deben ser disipados rápidamente mediante la emisión de partículas ligeras (mayoritariamente neutrones), para emitir a continuación rayos gamma, antes de alcanzar el estado fundamental del producto de la reacción. A cada paso del proceso de desexcitación, aumenta la posibilidad de fisión, de manera que la probabilidad final de que se produzca un elemento superpesado puede ser minúscula.

En Berkeley, Darmstadt y Dubna se investigaba la fusión completa, utilizando reacciones como el bombardeo de curio-248 ($Z = 96$) con calcio-48 ($Z = 20$) y métodos de detección sensibles a vidas medias tan cortas como 1 segundo. Sin embargo, no se ha observado nada que pueda ser atribuido a los elementos superpesados. Las ideas actuales más prometedoras parecen ser aquellas que implican el bombardeo de blancos radiactivos de vida corta más pesados y exóticos, como puedan ser el einstenio-254 ($Z = 99$) de 276 días de vida media y el einstenio-255 de 40 días de vida media, bombardeados con haces de calcio-48 para lograr núcleos en

la vecindad de 184 neutrones. (Tal vez, como si se tratara de otra herramienta, se disponga en el futuro de haces de núcleos radiactivos como calcio-50.) Las cantidades disponibles de estos materiales son, sin embargo, muy pequeñas, y los experimentos son extraordinariamente difíciles de realizar. Puede ocurrir simplemente que incluso la mejor combinación proyectil-blanco no produzca un núcleo lo bastante cercano al centro de la isla mágica como para sacar provecho de la mayor estabilidad que allí existe.

El foco actual de las investigaciones en esta área consiste en entender por qué estos elementos no han sido identificados todavía. ¿Se debe a que no pueden ser construidos con las herramientas de las que se dispone, o simplemente porque no pueden existir?

NÚCLEOS ALTAMENTE INESTABLES

Los modelos teóricos de la estructura nuclear sugieren que deberían existir y ser observados unos 8.000 isótopos diferentes de los elementos químicos, pero hasta el momento sólo se han descubierto unos 2.700. De éstos, unos 300 son los bien conocidos núclidos estables. Los otros 2.400 son los radiactivos, los cuales han sido producidos artificialmente en su mayor parte en los aceleradores de partículas y reactores nucleares; cada año se descubren alrededor de 30 o 40 nuevos isótopos. El estudio de estos núclidos inestables proporciona una copiosa fuente de información sobre modelos exóticos de desintegración nuclear, así como sobre el comportamiento del estado fundamental nuclear (masa, forma y momento angular) a medida que el cociente entre el número de protones y neutrones se desplaza hacia regiones altamente anormales, y sobre las propiedades espectroscópicas de núcleos de tan extraña composición.

Cuando se forma un núcleo, una pequeña cantidad de masa de los nucleones que los constituyen se convierte en energía. Esta se convierte en la energía de ligadura del núcleo, que domina la repulsión electrostática (Coulomb) entre los protones. Cuanta más masa de los nucleones se convierta en *energía de ligadura,* más estable —y menos masivo, para un número dado de nucleones— es el núcleo resultante. Por lo tanto, los núcleos *menos* estables poseen proporcionalmente *más* masa que los más estables, y las diferencias se denominan *excesos de masa.*

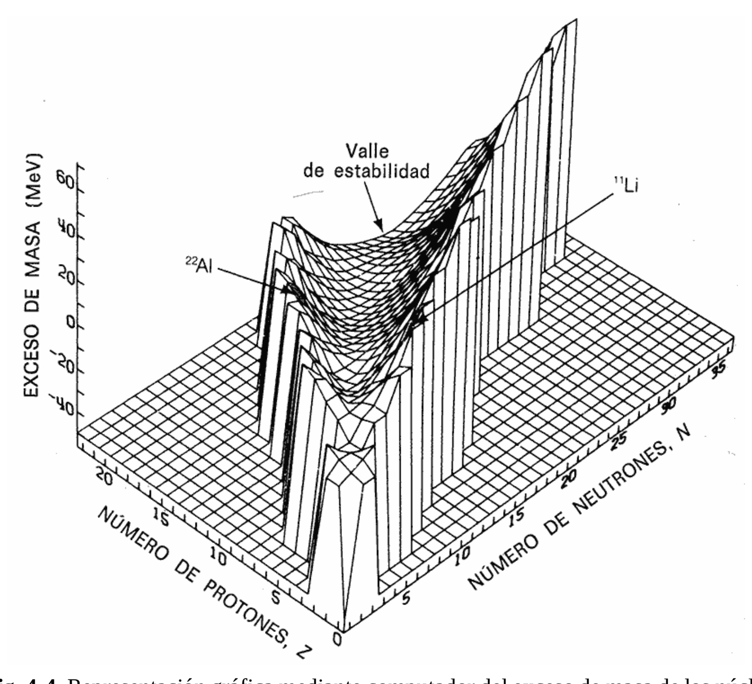


Fig. 4-4. Representación gráfica mediante computador del exceso de masa de los núclidos de los elementos hasta el titanio. Cuanto mayor es el exceso de masa, menos estable es el núclido, por lo que aquellos que se encuentran en la parte superior de la pared del valle son extremadamente inestables. Alternativamente, los núclidos situados a lo largo del fondo del valle son los más estables de todos. Los núclidos ^{11}Li y ^{22}Al se han explicado en el texto. (J. Cerny y A. M. Poskanzer, Scientific American, junio 1978, pág. 60.)

La figura 4-4 muestra el mapa del exceso de masa de los estados fundamentales de los núclidos más ligeros, mientras que los más estables, con masa mínima, ocupan el *valle de estabilidad*. Los núclidos que se encuentran a cierta distancia del valle de estabilidad son radiactivos, desintegrándose típicamente a través de transiciones beta, aunque también pueden hacerlo mediante transiciones alfa o fisión espontánea. Lejos del valle, cerca de los límites de estabilidad, es energéticamente posible que aparezcan nuevas radiactividades exóticas.

Radiactividades exóticas

La emisión beta demorada, mediante la cual un núcleo experimenta una desintegración beta y pasa a un estado excitado de su hijo, el cual emite a continuación un neutrón, un protón o una partícula alfa, se conoce desde hace varias décadas. Sin embargo, durante los diez últimos años, a medida que el desarrollo de las técnicas ha permitido la observación de los núcleos predichos en o cerca de la frontera de estabilidad, se han observado modos de desintegración que implican la emisión de más de una partícula después de la desintegración —específicamente, emisión— de dos neutrones, tres neutrones y dos protones.

Consideremos dos representantes de estos núcleos exóticos, cada uno de los cuales se encuentra en el límite de estabilidad del elemento en cuestión. Primero, en el lado *rico en neutrones* del valle, se encuentra el litio-11 (3 protones, 8 neutrones y una vida media de 8,7 ms). La energía de desintegración de estos núcleos es tan elevada (superior a 20 M*e*V) que cabe la posibilidad de que exista una gran variedad de modos de desintegración e incluso se han observado desintegraciones beta demoradas con emisión de dos y tres neutrones. Puesto que estos estudios requieren la detección de neutrones (lo cual es difícil debido a que son neutros), el núclido de litio padre se separa y se identifica primero, mediante una ingeniosa técnica desarrollada en el Laboratorio de Espectroscopia de Masas de Orsay, Francia. En esta técnica, el blanco del haz acelerador también actúa como un colector preferencial de los núcleos de metales alcalinos que se producen, el cual a su vez —debido a sus particulares propiedades de ionización superficial— actúa como la fuente de iones para un espectrómetro de masas adosado.

Segundo, en el lado del valle *deficiente* en neutrones, se encuentra el aluminio-22 (13 protones, 9 neutrones y una vida media de 70 ms). En este caso la energía de desintegración también es extremadamente elevada (mayor que 18 M*e*V), por lo que pueden producirse varios modos de desintegración, incluyendo la emisión de dos protones a través de una emisión demorada. Un particular canal beta produce el núcleo magnesio-22, el cual emite dos protones que son detectados simultáneamente. El mecanismo de esta desintegración posee considerable interés: ¿se trata en realidad de la emisión secuencial extremadamente rápida de los protones, o la emisión predicha de un diprotón (helio-2)? (El diprotón se considera como

una especie nuclear transitoria.) Se ha medido la correlación angular de los dos protones en la desintegración del aluminio-22. El mecanismo es complejo y parece ser ampliamente secuencial, aunque no puede descartarse alguna contribución del helio-2.

La función beta demorada, que es análoga a la emisión beta demorada de una partícula, es otra forma exótica de radiactividad. Permite extender los estudios «ordinarios» de fisión espontánea a regiones que se encuentran lejos del valle de estabilidad, debido a que la demora beta permite que estos núcleos vivan lo suficiente como para efectuar medidas experimentales. Un conocimiento de las barreras energéticas para la fisión de los núcleos que se encuentran lejos de la estabilidad resultaría útil para comprender la producción de elementos pesados a través del proceso *r* astrofísico, uno de los principales mecanismos estelares de nucleosíntesis.

En los límites de la región de núcleos deficientes en protones del valle de estabilidad, es posible que se produzca la desintegración por emisión directa de un protón (semejante a la desintegración alfa). Este modelo de desintegración, emisión directa de protones, fue observado por primera vez en un estado excitado de vida larga poco corriente del cobalto-53, un núcleo cercano al valle de estabilidad. La emisión de protones desde el estado fundamental ha sido observada recientemente en dos núcleos de tierras raras, el tulio-147 y el lutecio-151. El protón que se produce en la desintegración proporciona una valiosa comprobación empírica de los modelos nucleares que predicen a la vez las masas y vidas medias de los núcleos padres.

En 1984 se descubrió una sorprendente radiactividad exótica. Utilizando un equipo de laboratorio relativamente sencillo, un equipo de físicos de la Universidad de Oxford encontró que el radio-223, el cual se desintegra normalmente por emisión de partículas alfa con una vida media de 11,4 días, emite ocasionalmente un núcleo de carbono-14; esto ocurre unas dos veces por cada 10^9 desintegraciones. Que un modo tan novedoso de desintegración se observe en un núclido presente en la naturaleza (el radio-223 es miembro de una serie radiactiva que empieza en el uranio-235) es particularmente significativo, pues sugiere que pueden encontrarse en la naturaleza muchas otras desintegraciones que consistan en la emisión de un núcleo relativamente grande. Actualmente se están buscando, en muchos laboratorios del mundo, productos de desintegración masivos y cargados (como el neón-24, por ejemplo).

Secuencias isotópicas largas

Uno de los mejores métodos para aprender algo sobre un sistema físico caracterizado por dos cantidades consiste en cambiar el valor de una de ellas manteniendo la otra constante. Si se varía el número de protones Z o el número de neutrones N mientras se mantiene constante el otro, se puede observar una larga serie de núclidos cuyas propiedades cambian más o menos suavemente desde un extremo a otro (cualquiera de las columnas o hileras del mapa que se muestra en la fig. 4-5). Esto permite comprobar críticamente los modelos de estructura nuclear a través de sus cambios en el comportamiento al cambiar Z *o* N.

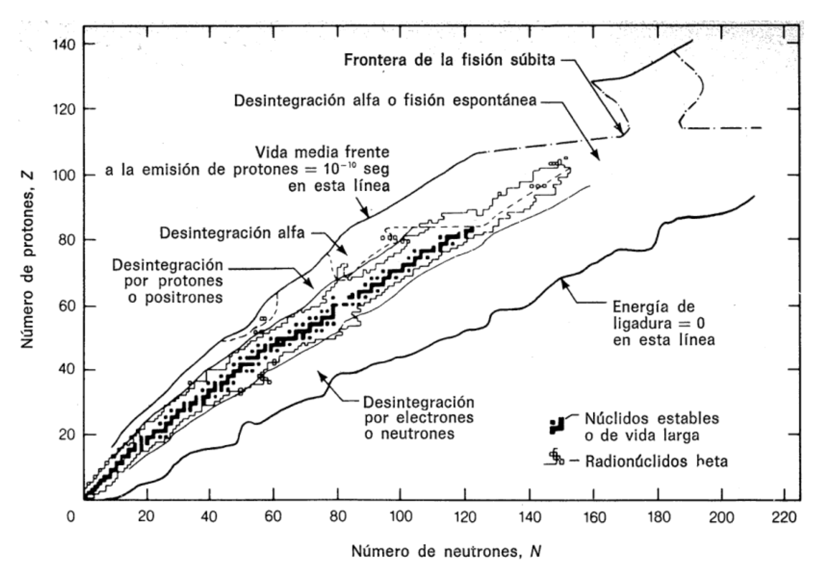


Fig. 4-5. Carta de núclidos que muestra varios tipos de desintegración nuclear en regiones situadas lejos del valle de estabilidad. Entre los muchos retos con que se enfrenta la investigación actual en física nuclear se encuentra la expansión de los límites de la región de núclidos conocidos. (G. N. Flerov, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, URSS.)

Algunos valores de Z o N se denominan *números mágicos* debido a que corresponden a capas completas del núcleo. Cualquier núcleo que posea

un número mágico (o cercano al mágico) de protones o neutrones será ligeramente más estable de lo que sería de esperar y, si se encuentra cerca de la estabilidad, será esférico. Por otro lado, en la región de la carta de los núclidos que se encuentra lejos de los números mágicos, los números estarán deformados y presentarán formas diversas.

El dato más interesante consiste en seguir una larga secuencia de isótopos a través de regiones esféricas y deformadas y a través de números mágicos teniendo en cuenta que cada una de estas secuencias atraviesa el valle de estabilidad en una dirección u otra. Generalmente, las deformaciones de los estados fundamentales de los núcleos concuerdan bastante bien con los cálculos teóricos, por lo que las pocas discrepancias observadas han conducido a refinamientos de la teoría.

Entre los desarrollos más significativos del estudio de los núcleos situados lejos del valle de estabilidad se encuentra el uso incrementado de haces atómicos y técnicas láser, los cuales proporcionan determinaciones extremadamente precisas de cantidades tales como el spin nuclear y el momento magnético. La sensibilidad de estos métodos permite efectuar medidas sobre pequeñas cantidades de isótopos de vida relativamente corta, de manera que pueden estudiarse largas secuencias de isótopos. En este campo, los separadores de masa, como los empleados en el ISOLDE del Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN) en Ginebra, han permitido efectuar grandes progresos.

Núcleos con rotación extremadamente elevada

Las reacciones entre proyectiles nucleares y elementos blanco pesados producen a menudo núcleos que giran extremadamente deprisa, es decir, que poseen momentos angulares altos. El estudio de cómo se desexcitan o relajan estos núcleos hasta llegar al estado fundamental ayuda a comprender la interrelación entre las diferentes fuerzas que controlan el comportamiento nuclear bajo condiciones tan extremas. Entre estas fuerzas se encuentran las centrífugas y las de Coriolis, que resultan familiares gracias a la física clásica. A medida que aumentan en magnitud, afectan a la estructura nuclear de forma cada vez más importante.

La *fuerza centrífuga* tiende a deformar el núcleo hacia formas no esféricas que involucran rotaciones colectivas de los núcleos. Estas deformaciones, que pueden ser oblatas (forma de pomo de una puerta) o prolatas (forma de balón de rugby), pueden acabar en una fisión nuclear. Es precisamente el inicio de la fisión nuclear el que limita generalmente la cantidad de momento angular que puede aguantar un núcleo. En la Tierra, la *fuerza de Coriolis*, que se debe a la rotación terrestre, provoca el desplazamiento este-oeste de los vientos septentrionales y australes. En un núcleo en rotación, la fuerza de Coriolis trata de alinear el spin de un nucleón individual con el eje, alrededor del cual se producen las rotaciones colectivas, de manera análoga a como un girocompás trata de alinearse con el eje de rotación de la Tierra. Estos alineamientos de las partículas individuales tienden a debilitar las rotaciones colectivas, mientras que el aplastamiento centrífugo tiende a estabilizarlas. El juego entre estos dos efectos opuestos hace posible que los fenómenos de rotación elevada sean tan ricos y variados.

Uno de tales fenómenos, descubierto en 1971, produjo una gran sorpresa. Al medir el ritmo de disminución de la velocidad de rotación nuclear en determinados núclidos de tierras raras que se estaban excitando desde estados de spin elevado, los físicos observaron que las curvas, generalmente suaves, presentaban de vez en cuando agudos dientes. Cada uno de estos dientes indicaba un *aumento* del ritmo de rotación, que continuaba disminuyendo de forma suave. Esto se debe a un súbito reordenamiento interno de la estructura nuclear que disminuye su momento de inercia (el cociente entre el momento y la velocidad angulares) y por lo tanto incrementa su ritmo de rotación. (Un patinador que esté girando y acerque los brazos al cuerpo, girará más deprisa exactamente por la misma razón, la ley de conservación del momento angular.)

La súbita reestructuración interna del núcleo podría recibir el nombre de «temblor del núcleo». Por diminuto que sea, se parece (aunque no existe relación alguna) a un fenómeno similar: «los temblores estelares» detectados por primera vez en 1969 en los pulsares de Vela y el Cangrejo. Un pulsar es una estrella de neutrones en rápida rotación (al igual que los núcleos de los que trata este apartado) que se frena a medida que pierde energía y momento angular; en muchos aspectos se parece a un núcleo gigante. En su curva de frenado también aparecen dientes similares a los de los núcleos cuando súbitas reestructuraciones internas provocan los «temblores estelares» (v. fig. 4-6).

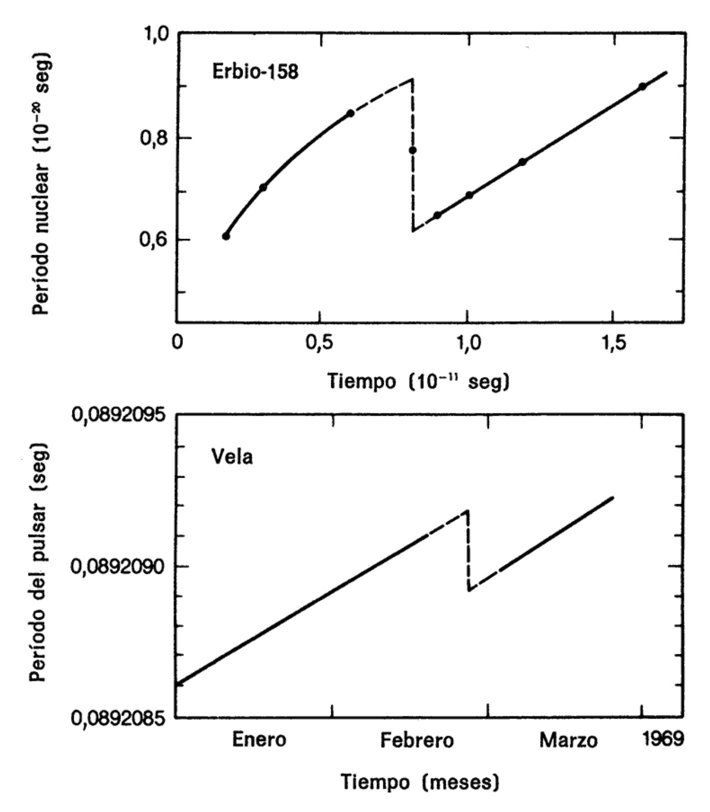


Fig. 4-6. Representaciones del período de rotación (el tiempo requerido para dar una vuelta completa) respecto al tiempo, para el núcleo de erbio- 158 y para el pulsar de Vela. (El núcleo se encuentra inicialmente en un estado de rotación muy elevado.) En ambos casos, el período de rotación aumenta con el tiempo, es decir, la rotación se frena, excepto cuando se produce un salto hacia atrás del tipo descrito en el texto. (Cortesía de R. M. Diamond y F. S. Stephens, Lawrence Berkeley Laboratory.)

Aunque los efectos de los temblores «nucleares» y «estelares» son los mismos, las causas no lo son. Los primeros están relacionados con las correlaciones entre parejas de nucleones en el núcleo (es decir, la tendencia de los nucleones a formar pareja con otros que poseen spin alineado en

sentido contrario) y son proporcionalmente mucho mayores que los segundos, los cuales, aunque se conoce muy poco sobre ellos, parecen estar producidos por reestructuraciones en el flujo interno de la estrella. No obstante, la similitud entre estos dos fenómenos situados en los extremos opuestos de la escala cósmica proporciona un buen ejemplo de la universalidad de las leyes físicas y de su potencia para extender nuestra comprensión intelectual sobre fenómenos que se encuentran más allá de las experiencias cotidianas.

SEGUNDA PARTE

IMPACTO DE LA FÍSICA NUCLEAR

5. Astrofísica nuclear

El estudio de la física nuclear apenas acababa de empezar, cuando los astrofísicos descubrieron, en los años 20, que los procesos que producían las enormes cantidades de calor y presión de radiación dirigida hacia el exterior tenían lugar en el interior más profundo del Sol para impedir que éste colapsara debido a su propio campo gravitatorio. El propio neutrón no fue descubierto hasta 1932, y debieron transcurrir otros 6 años antes de que los físicos nucleares pudieran emitir una explicación plausible del origen de la energía del Sol, que fue la siguiente: en una clase de reacciones denominadas de *fusión nuclear,* cuatro núcleos de hidrógeno se combinan para formar un núcleo de helio, con el desprendimiento (a escala estelar) de vastas cantidades de energía. Desde entonces, se ha establecido una simbiosis entre la física nuclear y la astrofísica, en la que el progreso en una disciplina ha espoleado el progreso en la otra. Los estudios de las reacciones nucleares en los laboratorios proporcionan muchos datos sobre el nacimiento, evolución y muerte de las estrellas, mientras que las medidas astrofísicas hacen lo mismo acerca de los procesos nucleares que son difíciles o imposibles de producir en la Tierra.

La astrofísica nuclear tiene por objetivo el estudio de las reacciones nucleares estelares que generan energía y que conducen a la formación de elementos químicos a través del proceso de *núcleo- síntesis.* Algunos de los campos más activos de la astrofísica nuclear actual están relacionados con los mecanismos de las explosiones de supernova, en las cuales se produce la nucleosíntesis de los elementos pesados, y la formación de las estrellas de neutrones. Estas últimas representan a la materia nuclear bajo condiciones de alta temperatura y densidad, a partir de las cuales puede obtenerse una profunda comprensión de la fundamentalmente importante ecuación de estado de la materia nuclear. Sin embargo, tal vez el punto más interesante en este campo sea el estatus de laboratorio nuclear fundamental que poseen las estrellas de neutrones, ya que son los únicos «núcleos» conocidos en los que se entretejen los efectos de las tres fuerzas fundamentales: la fuerza fuerte, la fuerza electrodébil y la gravitación.

En este capítulo se examinarán algunos de los temas más activos de la investigación astrofísica nuclear, los cuales muestran la manera como los

progresos en física nuclear básica benefician el desarrollo de otras ciencias y de la sociedad tecnológica como tal.

NÚCLEOS BAJO CONDICIONES ASTROFÍSICAS EXTREMAS

Las condiciones más extremas imaginables existieron durante sólo un instante en el principio del mundo durante la gran explosión, pero ha sido posible reconstruir una explicación plausible de este maravilloso suceso, así como sus consecuencias, gracias a los datos de los que se dispone actualmente. Entre los datos más importantes se encuentran las abundancias conocidas de los elementos químicos en las estrellas y las nebulosas —y en la propia Tierra—, pues estos valores imponen determinadas restricciones sobre los mecanismos teóricos a través de los cuales se ha producido la nucleosíntesis. Estas restricciones se basan no solamente en la naturaleza de las reacciones nucleares tal como se conocen a partir de determinados estudios, sino también en los procesos dinámicos por los cuales las estrellas pueden sufrir una muerte espectacular a través de una explosión de supernova.

Nucleosíntesis de los elementos ligeros

En el primer segundo después de la gran explosión no existían núcleos sino sólo partículas elementales y hadrones. Estos últimos eran básicamente nucleones y fue sólo al cabo de unos tres minutos —cuando la temperatura del naciente Universo se hubo enfriado hasta 1 billón de °K— cuando estas partículas empezaron a fusionarse para formar deuterones (^{2}H) y núcleos de helio-3 y helio-4 (^{3}He y ^{4}He); actualmente también parece posible que en este momento se formaran núcleos del isótopo litio-7. Estos cuatro núclidos son los *núclidos de la gran explosión*. Debió transcurrir por lo menos un millón de años más antes que el Universo se enfriara lo suficiente como para que estos núcleos capturaran electrones y se convirtieran en átomos, y unos pocos miles de millones de años para que se formaran las estrellas. Sólo cuando los fuegos nucleares de las estrellas empezaron a arder comenzaron a formarse los núcleos de otros elementos.

En el Universo actual, el hidrógeno y el helio representan, en números redondos, el 93 y el 7% respectivamente de los núcleos, mientras que los elementos más pesados representan sólo el 0,1%.

Aunque se cree que muchos de los elementos más ligeros se producen en los interiores estelares, algunos de ellos son demasiado frágiles como para sobrevivir al intenso calor, por lo que deben formarse en sitios más fríos. Estos elementos son los que se encuentran, en la tabla periódica, entre el helio y el carbono. Los núclidos en cuestión son ^{6}Li, ^{9}Be, ^{10}B y ^{11}B y las abundancias que se observan en ellos pueden explicarse bastante bien en términos de un modelo basado en el bombardeo de núcleos de elementos pesados del medio interestelar mediante rayos cósmicos. En estas *reacciones de astillado,* un proyectil energético rompe el núcleo blanco en varios fragmentos. Las medidas de las reacciones nucleares de astillado a la energía correspondiente a los rayos cósmicos son, desde hace poco tiempo, lo suficientemente extensas como para poder comprobar el modelo astrofísico. Por otro lado, se ha comprobado que las abundancias producidas por los *rayos cósmicos* y las observadas concuerdan.

Los cuatro núclidos producidos durante la gran explosión son los únicos que pueden atribuirse a esta fase del Universo. Es digno de mención el hecho de que la moderna teoría de la nucleosíntesis sea capaz de explicar las abundancias de estos cuatro núclidos en términos de un único valor hipotético de la densidad de bariones en el Universo primitivo. En términos de un Universo en expansión, esta densidad primordial debería dar lugar a una densidad comprendida entre $0{,}6\times10^{-31}$ y 11×10^{-31} g/cm^3 espectro que abarca netamente la densidad observada de la materia visible (3×10^{-31} g/cm^3) (v. fig. 5-1). Para que el Universo no estuviera *cerrado,* es decir, para que su propia atracción gravitatoria fuera suficiente como para detener la expansión, esta densidad tendría que ser 10 veces mayor. Sin embargo, no se sabe si el Universo *es cerrado* y tampoco se conoce dónde debe encontrarse la masa que falta, si es que existe.

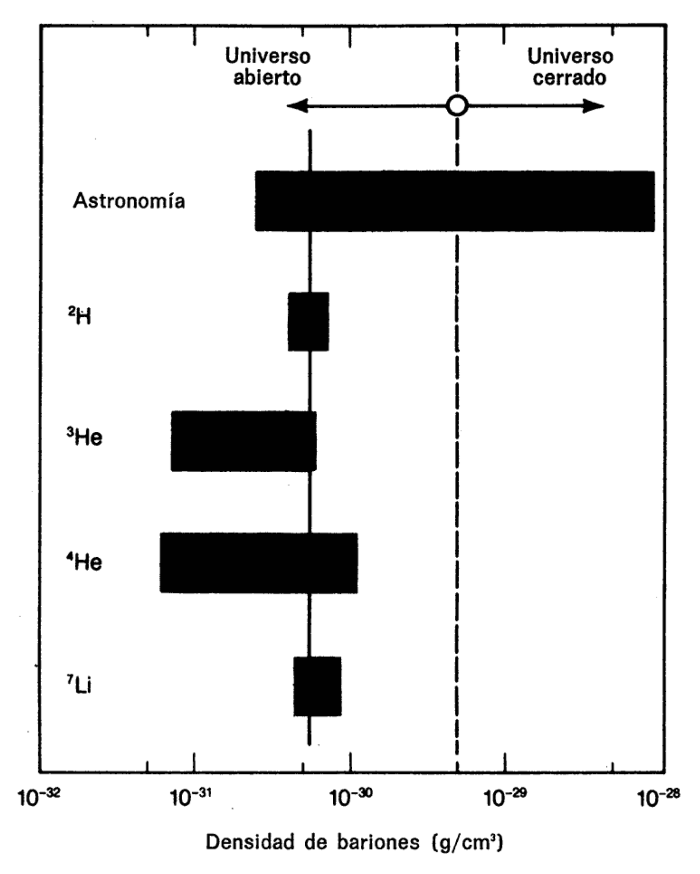


Fig. 5-1. A partir de las abundancias observadas de los cuatro núclidos procedentes de la gran explosión es posible deducir la densidad actual de bariones en el Universo. La barra sombreada de cada núcleo representa el rango de valores calculados a partir de su abundancia, y la línea vertical continua representa un mejor ajuste a estos datos. La densidad bariónica deducida de unos $5{\times}10^{-31}$ g/cm^3 es unas 10 veces menor que la requerida para que el Universo estuviera cerrado (línea vertical a trazos). Por lo tanto, esta evidencia resulta coherente si se aplica a un universo abierto. (Según S. M. Austin, en Progress in Particle and Nuclear Physics, Vol. 7, D. Wilkinson, ed., Pergamon Press, Oxford, 1981.)

Una posible contribución a la masa que falta podría ser debida a los neutrinos, en el caso de que éstos posean una masa. Los neutrinos existen en enormes cantidades por todo el Universo, pero puede establecerse un límite en el número de *tipos* de neutrinos (los tres actualmente conocidos corresponden a electrones, muones y tauones) a partir de la abundancia observada de ^4He producido en el Universo primitivo. Si aun así existiera otro (no detectado hasta la fecha), y si estuviera presente en grandes cantidades, habría contribuido sustancialmente a la densidad global de energía del Universo durante los tres primeros minutos y, por lo tanto, éste se habría expansionado más deprisa. Entre otras cosas, esta expansión más rápida habría aumentado el cociente número de neutrones-número de protones, y puesto que la mayoría de neutrones se incorporaron finalmente al núcleo de helio, el resultado habría sido una abundancia de ^4He mayor que la observada realmente.

Podría suceder, por lo tanto, que ya se hubieran descubierto todos los tipos de neutrinos que existen en el Universo, aunque no puede descartarse por completo la existencia de una cuarta especie. Las incertidumbres en las abundancias observadas de los núclidos, así como determinadas hipótesis del modelo de la gran explosión que todavía no han sido comprobadas, hacen que el cuadro no esté completamente claro. Lo que *sí* está claro es que la nucleosíntesis de los elementos ligeros está conectada con cuestiones fundamentales de la física de partículas y la cosmología.

Explosiones de supernova y formación de estrellas de neutrones

El estudio de las supernovas y de las estrellas de neutrones ha abierto una nueva área en el estudio de la astrofísica nuclear y ha motivado el inicio de una investigación experimental y teórica que conduzca hacia una comprensión más profunda de las variadas propiedades de los núcleos y de la materia nuclear, especialmente a altas densidades. En estrellas normales, como el Sol, la fuerza de la gravedad dirigida hacia el interior es contrarrestada por la presión hidrodinámica de los gases calientes dirigida hacia el exterior y, en menor extensión, de los fotones. Sin embargo, cuando el combustible nuclear se agota, algunas estrellas sufren un colapso gravitatorio y explotan como supernova (v. fig. 5-2). El residuo de este fantástico fenómeno es una pequeña pero extremadamente densa estrella

de neutrones. La física de la formación de una estrella de neutrones y el establecimiento de un nuevo equilibrio en contra de la gravedad están íntimamente ligados al comportamiento de la materia nuclear bajo condiciones extremas. En particular, actualmente parece que los neutrinos juegan un importante papel en el mecanismo del colapso de una supernova.

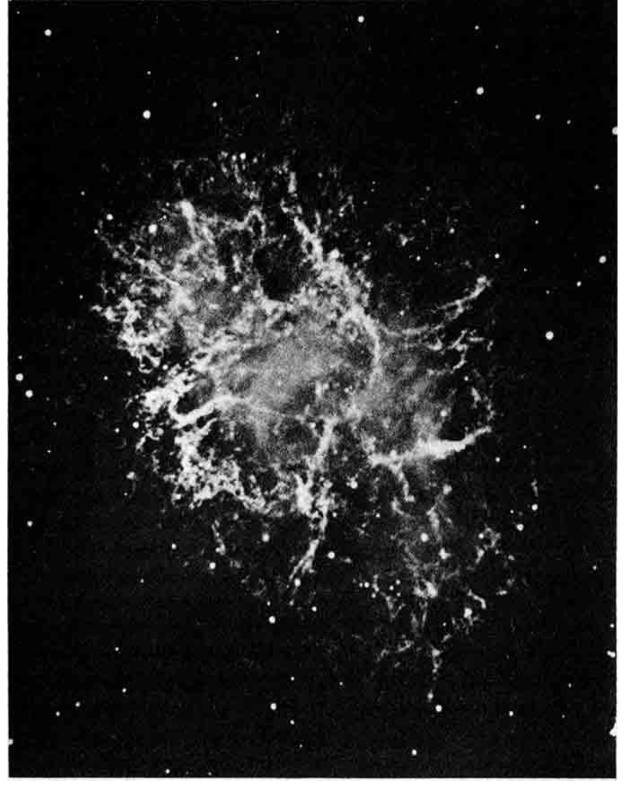


Fig. 5-2. Se cree que la Nebulosa del Cangrejo, de unos 5 años-luz de diámetro, que posee una estrella de neutrones en su centro es el residuo de una explosión de supernova que fue observada y registrada por los astrónomos chinos y japoneses —y tal vez por los indios norteamericanos— el 4 de julio del 1054. Permaneció visible a simple vista, en la constelación de Taurus, durante casi dos años. El por qué existen pocas evidencias de haber sido registrada por los astrónomos europeos y árabes continúa siendo materia de conjeturas. (Cortesía del Observatorio Lick, Universidad de California.)

La reacción de fusión del hidrógeno en las estrellas produce dos positrones y dos neutrinos. La mayor parte de la materia es casi perfectamente transparente para los neutrinos, de manera que la mayor parte escapa, rumbo al espacio. (Los experimentos para detectar neutrinos solares que pasen a través de la Tierra se describen más adelante en este capítulo.) Los neutrinos que se escapan enfrían la estrella ya que transportan parte de su energía de fusión, pero estas pérdidas de energía son ligeras durante la primera época de la vida de una estrella.

Cuando la estrella alcance la vejez y el hidrógeno ya se haya consumido en su interior, la temperatura central aumentará y provocará la expansión de las capas más externas hasta formar una estrella *gigante roja*, como es el caso del Sol. En las fases posteriores de su evolución, el interior de la estrella puede colapsar, desprendiendo enormes cantidades de energía gravitatoria. A medida que el colapso progresa, los núcleos calentados se reestructuran en otras especies más pesadas y ricas en neutrones que las que se encuentran habitualmente en las estrellas. Sin embargo, transformar un protón en un neutrón requiere la captura de un electrón, proceso en el que se desprende un neutrino. (La reacción inversa de captura de neutrinos producidos por la estrella da lugar a nuevos problemas en el estudio de los procesos de interacción débiles.) El aumento del flujo de neutrinos producido por la estrella que colapsa aumenta el ritmo de pérdidas de energía de la estrella; esto, a su vez, disminuye la presión interna y apresura el colapso. En una fase posterior, sin embargo, los neutrinos quedan atrapados en el interior de la estrella debido al enorme aumento de su densidad, la cual disminuye la transparencia de los neutrinos; esto inhibe las capturas electrónicas y detiene la síntesis de elementos pesados.

Cuando los núcleos son aplastados unos contra otros debido al elevado campo gravitatorio, el colapso es finalmente detenido por la parte repulsiva de la fuerza fuerte a distancias internucleónicas muy cortas. Esta compresión cuyo nivel llega hasta alrededor del doble de la densidad nuclear normal provoca el rebote de una intensa onda de presión que da lugar a una intensa onda de choque.

Se cree que esta onda de choque es la principal responsable de la explosión que expulsa el manto y la envoltura externas de la estrella hacia el espacio. Sin embargo, comprender cómo se propaga la onda de choque es complicado debido a la disociación de los núcleos a medida que el choque pasa a través de ellos, proceso que disipa parte de la energía.

Muchos otros aspectos de este modelo no están todavía resueltos. La capacidad de la onda de choque para expulsar las capas externas, por ejemplo, depende críticamente de la temperatura, densidad y composición de la estrella original; a su vez, estos factores son muy sensibles a los ritmos de captura electrónica debido a los diversos núcleos que están presentes y al ritmo de enfriamiento provocado por la emisión de neutrinos que los acompaña. El refinamiento del modelo está estorbado por el inadecuado conocimiento de las propiedades de los núcleos y de la ecuación de estado de la materia nuclear densa y caliente. Por ejemplo, predecir la cantidad de energía transmitida a las capas externas requiere una adecuada ecuación de estado. Un parámetro clave, la compresibilidad de la materia nuclear, se obtiene para la densidad ordinaria de la materia nuclear ($2{,}5\times10^{14}$ g/cm^3) a partir de las resonancias gigantes monopolares, tal como se explicó en el capítulo 2. Las colisiones de iones pesados relativistas pueden alcanzar el régimen de densidades (más de 10^{15} g/cm^3) que existe en un colapso de supernova, pero tales experimentos sólo han empezado recientemente (v. cap. 4).

La onda de choque de la supernova se forma en el exterior de un núcleo central de alrededor de una masa solar, de manera que la explosión de una estrella muy masiva deja como residuo detrás suyo únicamente una pequeña fracción de su masa. Si la masa del residuo es menor que 2,5 masas solares, se convierte en una pequeña pero densa estrella de neutrones que gira rápidamente, cuyo diámetro es del orden de 10 km. Otro tipo de residuos más masivos se convierten en agujeros negros y desaparecen de una visión directa.

Una estrella de neutrones puede delatar su presencia a través de la radiación electromagnética ya sea como *pulsar* o como *fuente compacta de rayos X*. Las estrellas de neutrones también pueden ser detectadas indirectamente si perturban los movimientos de una estrella visible con la cual estén asociadas para formar un *sistema binario*. Hasta la fecha se han identificado más de 300 estrellas de neutrones en nuestra Galaxia, y es posible que algunos agujeros negros hayan sido detectados indirectamente.

Procesos de interacción débil en las supernovas

Por lo que se conoce hasta el momento, las condiciones necesarias para que se produzca la síntesis de los elementos más pesados sólo tienen lugar en las supernovas. Todo el oro y el uranio que se encuentra hoy día en la Tierra, por ejemplo, puede provenir de una única supernova cuyas capas más externas barrieron la nube de gas interestelar dando lugar finalmente a nuestro Sistema Solar. Aunque las reacciones nucleares en las supernovas están dominadas, como ocurre en todas las formas de la materia nuclear, por la fuerza fuerte, el papel jugado por la interacción débil allí es crucial para describir la dinámica de las supernovas. Uno de tales procesos es la *captura electrónica,* o desintegración beta inversa.

Los ritmos de captura electrónica de los núcleos bajo condiciones de alta temperatura y densidad parecen estar dominados por la excitación de la resonancia gigante de Gamow-Teller (v. cap. 2) en el núcleo hijo; en este caso, los valores del spin y el isospín del núcleo cambian simultáneamente al producirse la transformación de un protón en un neutrón al capturar un electrón. Los ritmos calculados sobre la base de este modelo proporcionan información necesaria no sólo para construir modelos de supernova, sino también para obtener un análisis autoconsistente de los procesos de captura electrónica a través de la región de números másicos moderados comprendida entre 21 y 60. Para complementar experimentalmente este trabajo se requerirán haces de neutrones de alta energía que posean una dispersión energética pequeña. El propósito de tales haces sería excitar y estudiar la resonancia de Gamow-Teller en aquellos núcleos que sean el resultado de la captura electrónica en las reacciones estelares correspondientes.

Los núcleos extremadamente ricos en neutrones que se producen en las supernovas pueden encontrarse lejos del relativamente estrecho valle de estabilidad nuclear descrito en el capítulo 4. En realidad, el último neutrón puede estar tan débilmente ligado que permita su «goteo» desde el núcleo. Trabajos teóricos recientes sobre la desintegración beta de los núcleos que se encuentran lejos de la estabilidad han puesto de relieve el papel del espaciado de los niveles energéticos altamente excitados en el núcleo producto. La vida media de la desintegración beta es muy sensible a esta cantidad, y la vida media es un ingrediente crucial para calcular la producción de elementos pesados en las supernovas.

Refinados cálculos recientes sobre la desintegración beta proporcionan abundancias relativas de los núcleos que encajan extremadamente bien con los valores medidos. Las abundancias de estos elementos pesados y sus productos de desintegración pueden también utilizarse para estimar la edad del Universo (en realidad, la edad a la cual empezó la producción de elementos pesados) haciendo uso de las vidas medias de la desintegración beta y de los modernos ritmos de fisión con demora beta. El resultado obtenido es de unos 20.000 millones de años, lo cual no está en contradicción con el valor de 15.000 a 18.000 millones de años deducidos a partir del ritmo de expansión del Universo.

REACCIONES NUCLEARES EN LAS ESTRELLAS

Las modernas técnicas experimentales y teóricas han proporcionado una gran cantidad de información sobre muchas de las reacciones nucleares que generan energía y sintetizan elementos en las estrellas. En nuestro Sol, por ejemplo, el camino que sigue la fusión del hidrógeno empieza con la reacción p-p, en la cual dos protones reaccionan para formar un deuterón, emitiendo un positrón y un neutrino. Naturalmente, el Sol, que es la estrella más cercana a la Tierra, es la que ha sido estudiada más a fondo. Una manera indirecta de probar la validez de los modelos de estructura y dinámica solares consiste en comparar los resultados calculados con las propiedades físicas medidas del Sol o con las abundancias medidas de los elementos.

El problema de los neutrinos solares

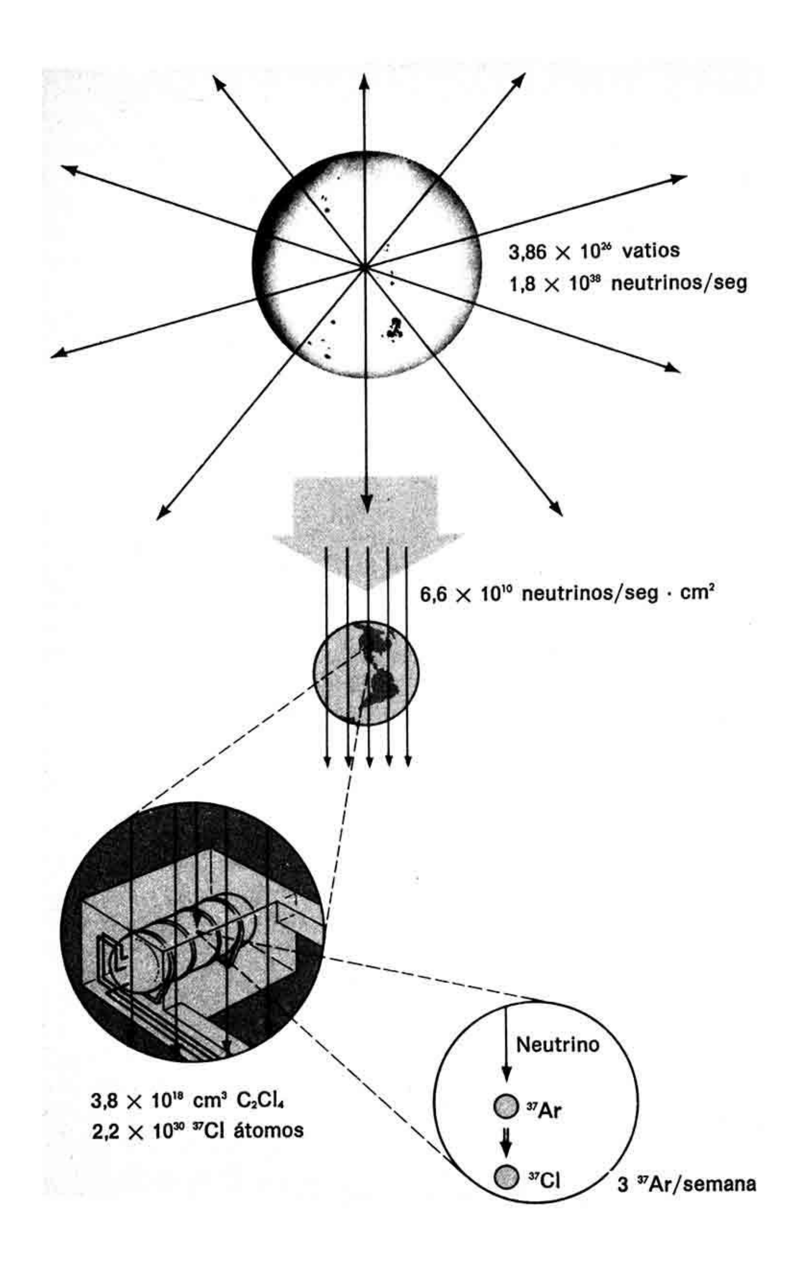
A principios del siglo XX, una mejora en la comprensión de las interacciones de los neutrinos sugirió un método relativamente directo de observar las reacciones nucleares que tienen lugar en el núcleo de Sol: utilizar un detector fijado en la Tierra para medir el flujo de neutrinos emitido por estas reacciones. Puesto que los neutrinos interactúan únicamente a través de la fuerza débil, fluyen a través del Sol sin prácticamente impedimentos y ofrecen un panorama de los procesos que ocurren allí. Los fotones, por el contrario, sufren una fuerte interacción electromagnética con el material

solar y emplean unos 10^7 años en ir desde el centro hasta la superficie solar.

En 1970 entró en funcionamiento un detector de neutrinos solares construido en el Laboratorio Nacional de Brookhaven e instalado en una mina de oro de Dakota del Sur a un kilómetro y medio de profundidad para protegerlo de los rayos cósmicos de fondo. En los experimentos llevados a cabo durante 14 años desde su instalación, el ritmo medio de cuentas era de tres capturas de neutrino por semana, aproximadamente un cuarto del ritmo predicho por los modelos solares. La discrepancia, que todavía no ha sido resuelta, se conoce como el *problema de los neutrinos solares.*

Los detectores de neutrinos solares están basados en un proceso nuclear, relacionado con la desintegración beta, en el cual un núcleo absorbe un neutrino y se transforma en un núcleo hijo emitiendo un electrón. En el detector radioquímico de Brookhaven (v. fig. 5-3) el núcleo blanco es cloro-37 (^{37}Cl), en forma de 400.000 litros de percloroetileno líquido para limpieza. El núcleo hijo, argón-37 (^{37}Ar), es un gas, el cual es relativamente fácil de extraer del líquido y medirlo. Sin embargo, la reacción en cuestión requiere una energía mínima de 0,81 M*e*V. Desgraciadamente, esta restricción provoca la insensibilidad del detector a la reacción p-p, la cual proporciona el 90% del flujo total de neutrinos solares, pero cuyos neutrinos tienen una energía máxima de 0,42 M*e*V.

Fig. 5-3. El experimento de neutrinos solares que se está llevando a cabo en una mina de oro de Dakota del Sur (ver el texto para más detalles). Por cada 10^{22} neutrinos que pasan a través del tanque de 400.000 litros de percloroetileno, sólo uno interactúa con un núcleo de ^{37}Cl. Cada una de tales interacciones produce un átomo de ^{37}Ar, el cual puede ser extraído y contado. El ritmo medio de unos tres neutrinos por semana es aproximadamente de un cuarto respecto al esperado. ►


3,86 × 10²⁶ vatios
1,8 × 10³⁸ neutrinos/seg
6,6 × 10¹⁰ neutrinos/seg · cm²
3,8 × 10¹⁸ cm³ C₂Cl₄
2,2 × 10³⁰ ³⁷Cl átomos
Neutrino
³⁷Ar
³⁷Cl
3 ³⁷Ar/semana

Un análisis de las reacciones implicadas muestra que el 80% de todos los neutrinos que *deberían* ser detectados por el ^{37}C1 proviene de una reacción secundaria (alrededor del 0,01% del total) en la cual un protón reacciona con berilio-7 para producir boro-8, el cual a su vez se desintegra en berilio-8 emitiendo un positrón y un neutrino con una energía máxima desde 14 M*e*V. La selectividad del detector de ^{37}C1 a esta reacción secundaria es en realidad una ventaja, pues esta reacción (a diferencia de la p-p) refleja sensiblemente las condiciones del centro del Sol.

El problema de los neutrinos solares representa el único fallo importante del modelo solar estándar, el cual, por otra parte ha tenido un gran éxito. Esta discrepancia entre el ritmo de cuentas de neutrinos medida y calculada ha propiciado reconsideraciones críticas de determinados aspectos de la física solar y de la física nuclear. Los ritmos nucleares en cuestión han sido confirmados gracias a los nuevos resultados de laboratorio. También se ha sugerido que los neutrinos electrónicos, en su camino hacia la Tierra, pueden sufrir oscilaciones hacia las formas muónica y tauónica, tal como se discutió en el capítulo 3. Sin embargo, no existe ningún indicio de que esto sea cierto, y el problema permanece bajo estudio.

El siguiente paso lógico debería ser la construcción de detectores poseedores de un núcleo blanco que pudiera responder a otras partes del espectro neutrínico predicho. El detector propuesto que está recibiendo mayor atención se basa en el galio-71 (^{71}Ga), el cual produce germanio-71 (^{71}Ge) al reaccionar con un neutrino. El detector de ^{71}Ga tiene la ventaja de que la mayoría de sus cuentas (63% del total) procederían de los neutrinos debido a la reacción p-p, la cual es la reacción básica responsable de la luminosidad del Sol.

El flujo de neutrinos procedente de la reacción p-p es relativamente insensible a las condiciones precisas existentes en el interior del Sol. Por lo tanto, si el ritmo que se midiera en el detector de ^{71}Ga fuera todavía menor que el predicho, sólo quedarían dos explicaciones posibles: o bien se produce alguna forma de oscilación o desintegración entre el centro del Sol y la Tierra, o el Sol produce energía a través de algún proceso de no equilibrio (de manera que produzca menos energía de la que radia). Recíprocamente, si los ritmos medidos y predichos *estuvieran* de acuerdo, se podría deducir un límite inferior para las diferencias de masa entre los diversos neutrinos de unos 10^{-6} *e*V o menos, y podría comprobarse que el Sol está produciendo energía a un ritmo consistente con la luminosidad

que se observa, aunque este hecho por sí solo no permite descartar la posibilidad de un proceso de no equilibrio.

Las pruebas efectuadas con un detector piloto construido con 1,8 toneladas de galio han mostrado una eficiencia del 95% o más en la recolección del ^{71}Ge producido por la reacción; actualmente se cree que un detector de tamaño real debería contener entre 15 y 30 toneladas de galio. Mientras tanto se encuentran en estudio otros posibles detectores, incluyendo aquellos que podrían ser capaces de medir los neutrinos solares directamente. Uno de ellos debería ser capaz de medir simultáneamente la energía y el momento de la interacción de un neutrino dado, mientras que el otro debería medir no sólo estas cantidades sino también la dirección de llegada del neutrino.

Evolución estelar

A medida que una estrella evoluciona desde la juventud hasta la vejez, sus fuentes primarias de generación de energía evolucionan desde la fusión del hidrógeno hasta otros procesos en los que intervienen elementos más pesados. Por lo tanto, para comprender la evolución estelar es necesario estudiar las reacciones nucleares correspondientes. La generación de energía y la nucleosíntesis producida por estas fases tardías de la evolución estelar han canalizado recientemente el interés en torno a este tema. En una gigante roja, por ejemplo, un proceso primario consiste en la fusión de tres núcleos de ^{4}He (partículas alfa) para formar carbono-12 (^{12}C), un proceso denominado *combustión del helio.* Algunos de los núcleos de ^{12}C pueden reaccionar posteriormente con el ^{4}He para formar oxígeno-16 (^{16}O), de manera que el cociente de la abundancia de ^{12}C a ^{16}O obtenido a partir de la nucleosíntesis depende del ritmo de la reacción del ^{12}C con el ^{4}He respecto al ritmo de formación de carbono a través de la combustión del helio. Actualmente existe una discrepancia de un factor 2 entre las diferentes medidas de laboratorio de la reacción ^{4}He más ^{12}C, lo que deberá ser resuelto mediante experimentos posteriores.

Recientemente se ha efectuado un trabajo considerable sobre las reacciones nucleares que afectan al aluminio y al magnesio, debido al descubrimiento en 1976 de que las inclusiones en el meteorito de Allende con-

tenían una proporción excesiva de ^{26}Mg respecto a otros isótopos del magnesio. El exceso del ^{26}Mg es directamente proporcional a la cantidad de aluminio presente, lo cual deja patente que el exceso de ^{26} Mg es debido a la desintegración del ^{26}Al que es radiactivo, el cual tiene una vida media de sólo 720.000 años. Recientemente, mediante detectores de alta resolución angular situados en satélites, se han descubierto rayos gamma procedentes de la desintegración del ^{26}Al en el medio interestelar. Estas observaciones apuntan hacia la presencia de una cantidad importante de ^{26}A1 distribuido en el plano de la galaxia y sugieren que la fuente más probable de este material procede de las explosiones de nova. Estos datos concuerdan con las recientes medidas de física nuclear que sugieren que las estrellas gigantes rojas y las novas son fuentes de ^{26}Al más probables que las supernovas.

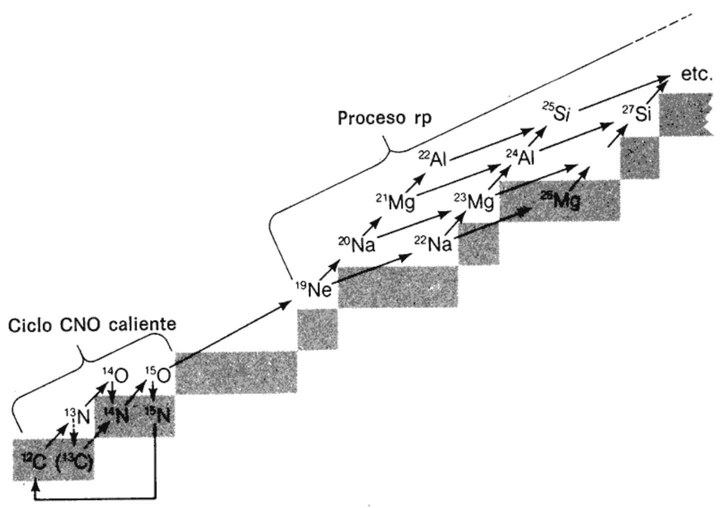


Fig. 5-4. Las series de reacciones nucleares tales como el ciclo CNO caliente y el proceso *rp* (captura rápida de protones) ocurren con escalas de tiempo que son cortas comparadas con las vidas medias de núclidos como el ^{13}N (10 minutos) y el ^{19}Ne (17 segundos). Se cree que estas fases explosivas de la nucleosíntesis tienen lugar en la superficie de las enanas blancas y de las estrellas de neutrones que están acretando hidrógeno fresco. Estas fases pueden ser representativas de las novas, las cuales ocurren a un ritmo de unas 25 por año en nuestra Galaxia.

Otro ejemplo del valor de la física nuclear para aumentar los conocimientos sobre la evolución estelar es el de las estrellas muy calientes, tales como las gigantes azules. En este caso, algunas especies nucleares radiactivas —tanto en su estado fundamental como en sus estados excitados de vida larga— son de gran importancia en ciclos de reacciones nucleosintéticas a pesar de que sus vidas sean relativamente cortas. Por ejemplo, la reacción de un protón con el nitrógeno-13 (vida media, 9,97 minutos) para dar oxígeno-14 (vida media, 70,6 segundos) forma parte del denominado *ciclo CNO caliente* (carbono, nitrógeno, oxígeno; v. fig. 5-4). El estudio experimental de tales reacciones es técnicamente muy difícil y requiere la producción de intensos haces de núclidos radiactivos. No obstante, esta capacidad técnica proporcionaría información importante sobre procesos astrofísicos y abriría la posibilidad de investigar reacciones nucleares que de otra manera serían inaccesibles.

6. Beneficios científicos y sociales

La física nuclear, tomada como ciencia en general, presenta una notable paradoja, ya que el estudio de su energía y de las armas nucleares forma parte de los temas de nuestra época mejor conocidos y debatidos con mayor ardor, mientras que la física del propio núcleo es posiblemente la menos comprendida de todas las ciencias básicas. Esto representa un gran problema a la vista del profundo impacto que la física nuclear ha ocasionado en otras ciencias así como en innumerables áreas de la tecnología moderna. Por ejemplo, ha incidido en campos que van desde la física del estado sólido a la genética molecular, desde la tecnología de los alimentos hasta la medicina forense, desde la prospección de minerales a la terapia del cáncer; los principios y técnicas de la física nuclear se aplican de manera tan diversa y numerosa que es imposible revisarlos completamente en este libro.

En el presente capítulo se hará referencia a unas cuantas aplicaciones de la física nuclear que reflejan su fuerte impacto en la ciencia y la tecnología. Aunque estas aplicaciones no tienen en cuenta los temas cósmicos de la astrofísica nuclear, discutidos en el capítulo anterior, los beneficios que confieren a la sociedad tecnológica son a la vez más inmediatos y más tangibles. Es importante observar que muchas de estas aplicaciones provienen de la investigación llevada a cabo con instalaciones de baja energía, las cuales han proporcionado muchas de las bases de los conocimientos actuales sobre física nuclear.

En el texto está implícita la idea de que el impacto de la física nuclear es, evidentemente, un camino en dos sentidos. Por ejemplo, muchos avances de la física nuclear dependen críticamente del grado de desarrollo de la tecnología de los aceleradores, lo que a su vez se traduce en nuevos desarrollos de la electrónica del estado sólido, la química física, la ciencia de materiales, la ingeniería criogénica y el diseño asistido por computador, para citar unos cuantos. La física nuclear teórica, que contribuye enormemente a la comprensión de las fuerzas básicas que gobiernan la naturaleza, también se beneficia en gran medida del desarrollo de los conceptos físicos y de los métodos matemáticos, así como de los computadores cada vez más rápidos y potentes.

FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA

Las fases condensadas de la materia normal —sólidos y líquidos— exhiben una enorme diversidad de formas y funciones, debido en parte a la gran variedad de elementos químicos y de enlaces que pueden establecerse. Las interacciones atómicas y moleculares son puramente electromagnéticas, lo cual simplifica la descripción de los sólidos y líquidos por comparación con la materia nuclear. Sin embargo, análogamente a lo que ocurre con la materia nuclear, pueden producirse una gran variedad de movimientos cooperativos que afecten a un gran número (en este caso, prácticamente infinito) de partículas que interactúen y cuyo efecto neto —superconductividad, por ejemplo— trasciende las propiedades fundamentales de las partículas. En particular, buena parte de la riqueza de los fenómenos del estado sólido se debe a tales efectos cooperativos.

Al sondear la estructura y el comportamiento de la materia sólida ordinaria (cristales por lo general), los físicos han descubierto que los haces de partículas nucleares aceleradas son extremadamente útiles, puesto que los núcleos (iones) de casi todos los elementos pueden ser implantados a la profundidad deseada en un cristal dado. El valor de esta técnica de *implantación de iones* para la física del estado sólido se basa en los estudios de la *interacción hiperfina,* que son sutiles interrelaciones entre las propiedades electromagnéticas de los iones implantados y la configuración electrónica del cristal. Tales estudios pueden revelar detalles de los modos de vibración del cristal así como de sus propiedades magnéticas y electrostáticas microscópicas. También se pueden estudiar aspectos de la estructura cristalina, tales como la localización y movilidad de las impurezas, así como del daño producido por la implantación de los iones y el efecto de los iones sobre la conductividad eléctrica del cristal.

La información obtenida a partir de la técnica de implantación y de otras técnicas derivadas de la investigación en física nuclear, tales como las *correlaciones angulares perturbadas,* resultan de gran valor para desarrollar nuevos materiales —aleaciones y compuestos magnéticos, por ejemplo— con propiedades diseñadas para propósitos específicos.

Otro fenómeno de la física del estado sólido que hace uso de las técnicas de física nuclear es la *canalización* de partículas cargadas en los cristales. En este caso, los energéticos proyectiles que bombardean la superficie de un cristal son canalizados a través de los túneles formados por las

filas de átomos adyacentes de la estructura cristalina (v. fig. 6-1). Dos estudios sobre el comportamiento de las partículas canalizadas —o a veces bloqueadas— en el interior de los cristales han proporcionado mucha información sobre las condiciones de la superficie y la localización de las impurezas, por ejemplo. Estos estudios pueden revelar un nivel de detalle mucho más profundo que el proporcionado por el mejor de los microscopios electrónicos y son particularmente útiles para evaluar los efectos del daño que la radiación provoca a los sólidos.

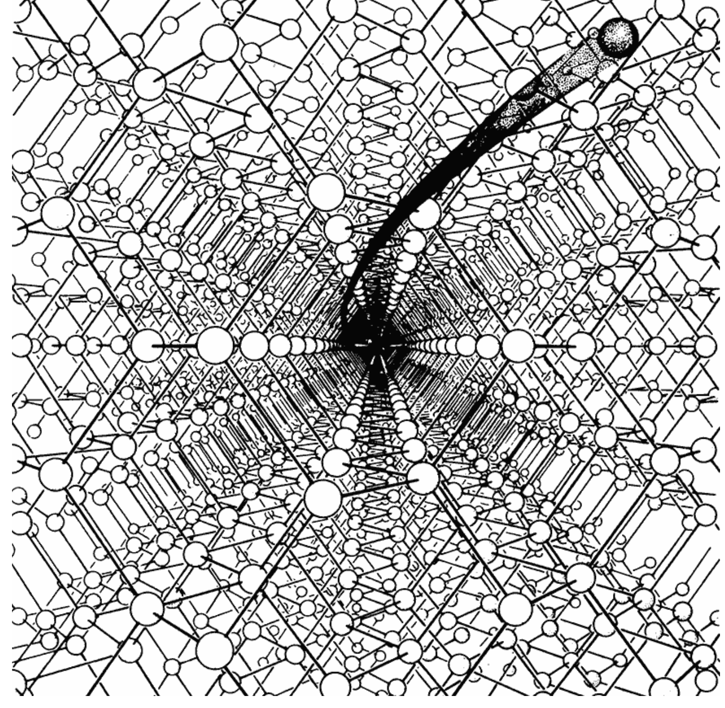


Fig. 6-1. Concepción artística del canalizado de una partícula con carga positiva en una estructura cristalina tipo diamante. La partícula sigue típicamente una trayectoria espiral formada por una serie de flexiones provocadas por la fuerza repulsiva de Coulomb entre la partícula y los núcleos. La distancia que ha recorrido la partícula durante una vuelta de la espiral es del orden de 100 distancias interatómicas. (W. Brandt, Scientific American, marzo 1968, pág. 91.)

Actualmente, las investigaciones sobre canalización de partículas se están llevando a cabo en muchos aceleradores, incluso en los de mayor energía. No parece que exista un límite aparente a la energía cinética de las partículas que pueden ser canalizadas en los cristales. Los efectos relativistas asociados con las velocidades extremadamente altas están siendo explotados para medir intervalos de tiempo ultracortos, en un esfuerzo para determinar las vidas medias —por debajo de $10\sim^{20}$ segundos o incluso menos— de algunas partículas elementales. Un interesante resultado de estos experimentos fue el descubrimiento de que curvando el cristal, podía conseguirse que incluso las partículas relativistas —con energías de centenares de G*e*V— siguieran trayectorias curvas. De hecho, esto provocaba una deflexión equivalente en un haz de las mismas características mediante un acelerador que requería poderosos imanes superconductores.

Los *positrones* emitidos por algunos elementos radiactivos se han utilizado como sondas durante muchos años para cartografiar las distribuciones de carga y energía en los sólidos. Sin embargo, durante los últimos años, los haces de alta calidad e intensos de *muones*, tanto positivos como negativos, desarrollados en los laboratorios de física nuclear, han demostrado ser más versátiles que los positrones en el estudio de los sólidos. Los muones son leptones pesados, mucho más pesados que los electrones o los positrones, pero mucho más ligeros que los nucleones. Sólo su masa intermedia ya les convierte en una valiosa sonda para estudiar fenómenos de estado sólido como la difusión de partículas. Las características de sus propiedades de desintegración también son considerables.

Adicionalmente, los haces de muones poseen la útil propiedad de tener el spin polarizado en casi un 100%, es decir, sus spins están todos orientados en la misma dirección. Esta propiedad proporciona la base para la técnica de la *rotación del spin del muon,* en el cual se sigue el cambio de dirección y la degradación de la polarización del spin después que el haz ha sido inyectado en el cristal. El ritmo y grado de estos cambios proporciona información sobre el ambiente magnético local del muon, en cualquiera de las diferentes posiciones de la red cristalina.

Como sonda local de la dinámica y estructura del estado sólido, la rotación del spin del muon proporciona un excelente complemento a diversas técnicas derivadas de la física nuclear, tales como *espectroscopia de resonancia magnética nuclear*, *espectroscopia Mössbauer* y *difusión de neutrones*. Estas últimas tres técnicas también son utilizadas en diversos

grados por químicos, biólogos, geólogos y otros científicos en innumerables aplicaciones analíticas. La influencia que la física nuclear ejerce sobre estas ciencias es beneficiosa y de gran alcance.

FÍSICA ATÓMICA

Aunque cada átomo contiene un núcleo, muchas de las propiedades físicas del átomo están determinadas por su nube de electrones orbitales. Los electrones no sólo interactúan entre sí (a través de las fuerzas repulsivas de Coulomb) sino también a través de los campos eléctrico y magnético del núcleo. Del mismo modo que varían las propiedades de los núcleos a través de la tabla periódica o a través de la secuencia isotópica de un elemento dado, también lo hacen, aunque en diferente grado, las propiedades características de los espectros ópticos asociados a los átomos, los cuales están determinados por los niveles de energía de los electrones y por las transiciones entre ellos.

Sin embargo, ya que los aceleradores nucleares pueden producir haces de iones con una energía y un estado iónicos controlados con precisión, es posible crear especies atómicas exóticas muy distintas de las que existen bajo condiciones ordinarias, y utilizar, por lo tanto, los haces nucleares para estudiar nuevos aspectos de la física atómica. Tales experimentos y los correspondientes cálculos de estructura atómica son interesantes por sí solos. También tienen un interés directo en los estudios sobre la naturaleza de los plasmas propios de la fusión termonuclear —tanto en los interiores estelares como en máquinas terrestres como los reactores de fusión denominados tokamaks.

En las colisiones entre iones muy pesados (uranio y curio, por ejemplo, para los cuales el valor combinado de Z es 188), puede crearse un sistema nuclear masivo que puede subsistir el tiempo suficiente como para que los electrones de los dos iones puedan reestructurarse a sí mismos en una configuración que corresponde al valor combinado de Z. Sin embargo, a veces, cuando se forma este pseudoátomo que posee un valor extremadamente alto de Z, se produce una vacante en la capa más interna de electrones. Esta capa permanece fuertemente ligada mientras los núcleos están cerca, y si el hueco se llena durante este período, es como si formalmente se creara un positrón. De hecho, recientemente se han detectado positrones en las

colisiones de iones pesados del acelerador GSI de Darmstadt, Alemania Occidental, en los que, sorprendentemente, se observa una estructura discreta superpuesta a un espectro continuo. El origen de los rasgos agudos presentes en la estructura constituye un misterio. Y se ha llegado a especular si esto es debido a la formación de un complejo nuclear gigante de vida relativamente larga o a algún tipo de fenómeno físico desconocido hasta ahora.

En otro experimento de física atómica, los iones pesados de alta energía son despojados de la mayor parte de sus electrones haciéndolos pasar a través de películas delgadas o de gases a baja presión. La ionización cuidadosa puede proporcionar núcleos pesados con sólo un electrón orbital (ion hidrogenoide) o dos electrones (ion tipo helio). Estas especies exhiben, por lo tanto, un desequilibrio enorme entre su carga positiva nuclear y su carga electrónica. El estudio de su espectro atómico proporciona una oportunidad única para comprobar alguna de las predicciones más estrictas de la electrodinámica cuántica (QED), es decir, de la teoría cuántica del campo de la interacción electromagnética. Una de estas predicciones está relacionada con el pequeño, pero fundamental, efecto denominado *desplazamiento Lamb,* que puede ser medido con gran precisión. Hasta la fecha, todas las medidas del desplazamiento Lamb en iones hidrogenoides (por ejemplo, el cloro con un solo electrón) y los iones tipo helio (por ejemplo, el neón con dos electrones) han confirmado la veracidad de la QED.

También es posible despojar a un ion acelerado de todos sus electrones, dejando como proyectil un núcleo desnudo. En 1982, se demostró la posibilidad de producir uranio completamente ionizado ($^{92}U^{+}$) en el acelerador Bevalac del Lawrence Berkeley Laboratory. También se han producido iones pesados completamente ionizados en el Brookhaven National Laboratory. Las colisiones entre estos núcleos lentos y átomos blanco producen pseudoátomos muy pesados, de vida relativamente larga. Se espera que el estudio de los rayos X que resulten de estas colisiones proporcionen una mejor comprensión de los procesos que son críticos para la producción de átomos superpesados, así como comprobaciones adicionales de los fenómenos de la QED en especies atómicas muy pesadas.

Los experimentos descritos anteriormente ilustran unas cuantas maneras de cómo las técnicas de la física nuclear han agrandado los límites de la física atómica, aumentando y profundizando los conocimientos sobre este tema vital.

GEOLOGÍA Y COSMOLOGÍA

Los objetos antiguos —tanto procedentes de la naturaleza como construidos por el hombre y tanto de origen geológico como de origen cosmológico— fascinan a los científicos de muchas disciplinas debido a las valiosas claves que proporcionan sobre la naturaleza del ambiente en el cual se formaron. Además del análisis químico y, a veces, microbiológico de tales objetos, es evidente que su datación precisa resulta de gran importancia. La familiar técnica de datación mediante el radiocarbono (utilizando carbono-14, que posee una vida media de 5.730 años) fue una de las primeras aplicaciones de la física nuclear. Ha demostrado poseer un valor inestimable en arqueología y paleontología, permitiendo a los científicos datar sucesos que sucedieron hace 50.000 años. Medidas similares de los productos de desintegración de otros radionúclidos de vida larga han extendido la aplicabilidad de la técnica.

Otro importante avance en la técnica de datación ha tenido lugar en base a un subproducto de la investigación en física nuclear. Varios aceleradores de iones pesados de todo el mundo han sido modificados para ser utilizados como espectrómetros de masa ultrasensible, en los que los átomos de los radionúclidos de vida larga de la muestra se cuentan directamente, en lugar de indirectamente (y lentamente), a través de la radiación asociada con la desintegración. El resultado inmediato de esta capacidad para circunvalar el tedioso procedimiento de seguir la emisión radiactiva del espécimen ha sido el espectacular aumento de la sensibilidad de las medidas de la edad, concretamente en un factor de 10^{12}. Esta sensibilidad permite a su vez utilizar muestras muchos más pequeñas (en el rango del microgramo al miligramo).

Por lo tanto, la técnica de la *espectrometría de masas mediante un acelerador*, que todavía se encuentra en sus inicios, pero que se está desarrollando rápidamente, ha ampliado enormemente los conocimientos científicos del pasado. Entre la creciente lista de objetos que están siendo investigados con esta poderosa nueva técnica se encuentran el metano atmosférico, el hielo polar, los sedimentos lacustres y oceánicos, los nódulos de manganeso, las tectitas, y los meteoritos y radionúclidos de vida larga producidos por los rayos cósmicos.

Geofísicos, paleoclimatólogos, cosmólogos y otros científicos ganarían mucho terreno con tales estudios, puesto que éstos revelan informaciones nuevas sobre cambios que han ocurrido tanto en la Tierra como fuera de ella durante períodos que van desde los millares a las decenas de millones de años. Ya se ha descubierto, por ejemplo, que algunos nódulos de manganeso del fondo del océano han crecido a un ritmo regular (del orden de unos milímetros por cada millón de años) durante períodos de hasta 10 millones de años, mientras que otros han crecido a ritmos muy distintos durante períodos diferentes del tiempo geológico. Este último fenómeno sugiere que en el pasado se han producido cambios significativos del contenido en manganeso y hierro en el ambiente submarino donde se han desarrollado.

Otro descubrimiento interesante en torno a las profundidades marinas es que los sedimentos oceánicos en los bordes de las placas tectónicas no han sido arrancados durante el proceso de subducción, mediante el cual el borde de una placa de la corteza se dobla hacia abajo y se desplaza muy lentamente por debajo del borde de la otra. En lugar de esto, los sedimentos han sido arrastrados por la placa que se sumerge, para reaparecer finalmente durante una de las erupciones volcánicas que se producen en estas regiones geológicamente volátiles. Los radionúclidos cuyos átomos fueron contados en estos estudios, como también en aquéllos de los nódulos de manganeso, fueron el berilio-10, cuya vida media es de $1{,}6\times10^6$ años; este isótopo nos permite datar sucesos que ocurrieron durante los últimos 10 o 20 millones de años. Los radionúclidos manganeso-53 e iodo-129 (vidas medias de $3{,}7\times10^6$ años y $1{,}6\times10^6$ años respectivamente) son también muy útiles en los estudios geocronológicos sobre una escala de tiempo grande, mientras que el aluminio-26 (vida media de $7{,}2\times10^5$ años) es útil sobre una escala de tiempo de pocos millones de años.

Cualquier objeto, como los meteoritos y los rayos cósmicos, que provenga del espacio y alcance la Tierra posee un obvio interés científico. Hasta hace poco, se creía que la mayoría de las tectitas —unos extraños objetos vítreos que se encuentran profusamente distribuidos en los suelos y los fondos marinos— eran de origen extraterrestre. Sin embargo, cuidadosas comparaciones entre sus composiciones químicas y las de las rocas terrestres y extraterrestres, utilizando los aceleradores como espectrómetros de masas, han mostrado actualmente que las tectitas son, después de todo, objetos de origen terrestre. Cualquiera que sea el significado último

de este hecho, su descubrimiento ejemplifica el hecho de que en la investigación científica se sabe que se obtendrán progresos pero nunca se sabe de dónde provendrá el gran descubrimiento.

MEDICINA NUCLEAR Y RADIOLÓGICA

Durante muchos años, los físicos nucleares han estado colaborando con físicos, químicos, farmacólogos y expertos en cálculo en un intento de resolver algunos de los problemas de salud más perniciosos de la sociedad. Estos esfuerzos han permitido que la medicina nuclear se considere como una parte normal de la práctica médica moderna. Mientras que las técnicas más ampliamente aplicadas de la medicina nuclear necesitan los trazadores radiactivos para diagnosticar enfermedades y seguir su tratamiento, los radionúclidos y los haces de partículas aceleradas también juegan un papel terapéutico importante. Además, la física nuclear también sirve a la ciencia médica a través del desarrollo de materiales exóticos para su uso en implantes prostéticos.

En un examen típico de medicina nuclear, de los que se realizan muchos millones cada año, se administra de forma intravenosa un radiofármaco, y los rayos gamma emitidos por el trazador son registrados mediante una red de detectores situados alrededor del paciente; esta técnica se denomina *tomografía de emisión.* Los compuestos trazadores se escogen habitualmente de forma que sean absorbidos selectivamente por el órgano o tejido sobre el cual los rayos gamma deberán proporcionar una imagen detallada. Los grandes avances en el diseño de los detectores y en la adquisición y análisis de datos han producido una gran mejora en los instrumentos utilizados para la tomografía de emisión, tanto del tipo de emisión de fotones como de positrones (v. fig. 6-2). Para un especialista, las imágenes registradas pueden revelar anormalidades estructurales o metabólicas cuyo reconocimiento suele conducir a un diagnóstico de certeza que de otra forma sería muy difícil o incluso imposible.

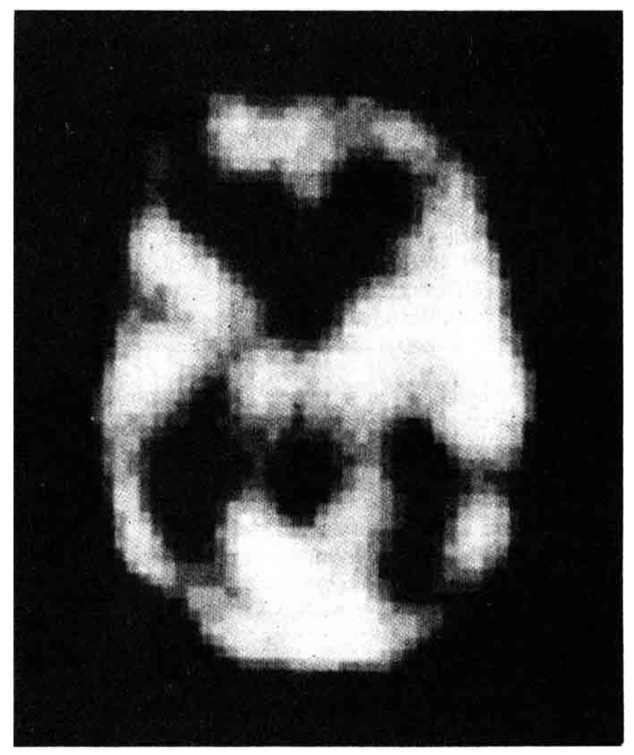


Fig. 6-2. Imagen tomográfica, sección transversal, del cerebro humano que muestra la demanda regional de oxígeno. Unos cuantos segundos después que el sujeto hubiera inhalado oxígeno marcado con el radionúclido emisor de positrones ^{15}O (vida media de 122 segundos), su distribución quedaba revelada (zonas brillantes) por los rayos gamma producidos por la aniquilación de positrones con electrones del tejido circundante. La técnica de la tomografía por emisión de positrones se ha convertido en una poderosa herramienta de la medicina nuclear. (Cortesía de R. J. Nickles, Universidad de Wisconsin.)

El desarrollo reciente del radionúclido talio-201 desde la fase de investigación hasta la fase de producción comercial para su uso clínico mundial proporciona una ilustración de cómo se produce el progreso en las investigaciones multidisciplinarias. Uno de cada seis estadounidenses padece una enfermedad cardiovascular, a menudo sin diagnosticar, y cada año se

producen unas 70.000 muertes por ataque al corazón. Hasta hace pocos años, los núclidos trazadores que se utilizaban en el diagnóstico precoz de las enfermedades cardiovasculares eran generalmente insatisfactorios. Sin embargo, una vez demostrado que el talio que se administraba era rápida y selectivamente absorbido por el músculo cardiaco, los científicos nucleares desarrollaron técnicas para producir talio-201 (vida media de 73 horas) en cantidades comerciales y a un precio asequible. Como consecuencia, en 1981 se administraron tests cardiológicos nucleares a unos 250.000 pacientes que utilizaban este núclido.

Un ejemplo todavía más impresionante del progreso de la medicina nuclear lo constituye el desarrollo del radionúclido tecnecio-99m (un estado excitado metastable del tecnecio-99, cuya vida media es de 6 horas). Los radiofármacos que incorporan este núclido a su composición, han demostrado su valor incalculable en el estudio del cerebro, el hígado, el tiroides, los pulmones, el sistema esquelético, los riñones, el corazón y el sistema hepatobiliar. En el año 1981 se aplicó el tecnecio-99m en unos cinco millones de pacientes en Estados Unidos.

Aproximadamente la mitad de los 850.000 nuevos casos de cáncer que se producen cada año en Estados Unidos reciben terapia radiológica, bien sola o bien combinada con cirugía o quimioterapia. La efectividad de la radioterapia puede aumentarse mejorando la localización y el efecto biológico de la dosis, ya que ambos tienen como consecuencia un mayor daño del tumor y un menor daño del tejido normal. Las mejoras en la localización de las dosis pueden ser obtenidas mediante el uso de haces de partículas cargadas tales como electrones, protones, iones pesados y piones negativos. La efectividad biológica depende en parte del poder de frenado del tejido para la partícula en cuestión y puede aumentarse utilizando energías cuya capacidad de frenado es más eficaz.

La física nuclear contribuye de varias maneras a esta investigación en el campo de la medicina. Para calcular el tipo óptimo, la energía del haz primario, el material blanco, la protección necesaria y la distribución de las dosis se necesita una profunda comprensión de los fenómenos nucleares y atómicos. Debido al pequeño margen que existe entre la respuesta de los tumores y los tejidos normales, es necesario observar y controlar las dosis con una precisión de hasta el 5% para que el tratamiento sea adecuado. Tanto en la terapéutica radiológica como en la medicina nuclear, el

progreso depende de la estrecha colaboración entre físicos, químicos y médicos, así como de los avances que se producen en la instrumentación y en la física de los aceleradores. Por ejemplo, la mejora en el diseño de aceleradores lineales compactos y relativamente baratos ha permitido su uso extensivo en la radioterapia clínica con rayos X y con haces de electrones.

Un último ejemplo de este breve resumen sobre las contribuciones de la física nuclear en la medicina lo constituyen los recientes trabajos sobre aleaciones quirúrgicas para la implantación de aparatos ortopédicos articulados, tales como articulaciones artificiales para las caderas. Cada año se realizan en Estados Unidos alrededor de 75.000 operaciones de sustitución de articulaciones de cadera. Desgraciadamente, estas articulaciones se deterioran gradualmente con el uso prolongado debido a los efectos corrosivos de los fluidos habituales del cuerpo; por lo tanto, los desechos metálicos que se producen pueden envenenar e inflamar los tejidos circundantes. Esto puede obligar a un reemplazamiento de la articulación, y, obviamente, a una desagradable prospección.

Sin embargo, los científicos de materiales han efectuado un importante paso hacia la solución de este problema. Utilizando fuentes de iones y tecnologías de aceleradores desarrolladas inicialmente por los físicos nucleares para la investigación básica, se ha averiguado que la implantación de iones de nitrógeno con una concentración del 20% a una profundidad de 100 nanómetros (100×10^{-9} metros) en la superficie de una típica aleación quirúrgica reduce la corrosión por uso en un factor de por lo menos 400. Las aplicaciones clínicas con éxito de estos nuevos resultados pueden ser muy beneficiosas para los pacientes que requieran articulaciones artificiales.

ANÁLISIS Y MODIFICACIÓN DE MATERIALES

Disponiendo de fuentes de iones, aceleradores e instrumentos desarrollados en la investigación nuclear de baja energía, los investigadores de numerosas disciplinas utilizan haces energéticos de iones para estudiar y modificar las propiedades de la superficie de los materiales de una manera altamente selectiva y a menudo única. Cuando estos haces de iones son detenidos por un sólido, se produce una implantación de iones que puede alterar o incluso dominar las propiedades eléctricas, mecánicas, químicas,

ópticas, magnéticas o superconductoras del material y los resultados son, a menudo, espectaculares.

Tal vez el uso más importante en cuanto a la implantación de iones se refiere proviene de la electrónica de estado sólido. La mayoría de los aparatos semiconductores requieren la contaminación selectiva de cristales de germanio o silicio con átomos de impurezas, por lo que la implantación de iones se ha convertido rápidamente en la técnica dominante en la industria de los semiconductores. Entre sus muchas ventajas se encuentra el que permite una miniaturización extrema; consecuentemente, muchos instrumentos semiconductores y circuitos integrados de relojes, calculadoras, chips para computadores y otros productos electrónicos que requieren componentes pequeños se fabrican siguiendo este método.

La implantación de iones también ha sido explotada en otras aplicaciones. La perturbación controlada por iones de aisladores y semiconductores es utilizada para alterar el índice de refracción de tales materiales con el objeto de fabricar guías ópticas y mezcladores así como para modificar selectivamente las memorias magnéticas. La implantación de iones resulta esperanzadora si se desea encontrar un método que permita fabricar materiales superconductores de alta temperatura, puesto que éstos requieren la formación o estabilización de fases metastables que deben existir únicamente a una profundidad de unas pocas decenas de nanómetros de la superficie. Recientemente se ha descubierto que el bombardeo por iones es efectivo para ligar películas delgadas a un sustrato.

El estudio del comportamiento de impurezas ligeras tales como el hidrógeno y el helio embebidas en materiales —y los cambios de las propiedades de los materiales inducidos por la presencia de tales impurezas— ha sido llevado a cabo durante los últimos años mediante nuevas tecnologías basadas en los aceleradores. La distribución en profundidad de la impureza puede ser cartografiada con precisión utilizando el brusco comportamiento resonante de las reacciones nucleares en función de la energía del haz incidente. Estas reacciones que utilizan haces de litio-7, boro-11, nitrógeno-15, flúor-19 y cloro-35, tienen una resolución en profundidad muy elevada (alrededor de 5 nanómetros) y una elevada sensibilidad (más que una parte en un millón). Los problemas en los cuales se utiliza esta técnica incluyen la erosión de las paredes de los reactores termonucleares, la caracterización de las células solares de silicio amorfo, el endurecimiento de aceros y la contaminación de niobio por hidrógeno, y los efectos del viento solar

(núcleos de hidrógeno y helio de alta energía emitidos por la corona solar) en las rocas lunares.

TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS

La investigación básica en física nuclear ha creado —y continúa creando— una enorme cantidad de tecnologías avanzadas que impregnan todo el desarrollo de la investigación relacionada con la energía. Los ejemplos más familiares son, evidentemente, los de la fisión y fusión nucleares. Los reactores nucleares de fisión satisfacen normalmente alrededor del 13% de la demanda de potencia eléctrica de Estados Unidos, mientras que la fusión nuclear satisfará la mayor parte de la demanda del siglo XXI.

Asimismo, el impacto de la física nuclear también se observa en otras áreas menos conocidas. Las técnicas nucleares son utilizadas por la industria de la prospección para sondear formaciones geológicas y localizar hidrocarburos y otros recursos valiosos que se encuentran a grandes profundidades. Formas nucleares pasivas para la excavación de pozos emplean detectores de rayos gamma para distinguir regiones que contienen arenas limpias y carbonatos (baja radiactividad natural) de las menos productivas, pero más radiactivas, que contienen yesos o pizarras. Técnicas de perforación más sofisticadas generan neutrones con la ayuda de aceleradores nucleares miniaturizados que pueden ser introducidos en las barrenas de muestreo, las cuales tienen un diámetro típico de 10 centímetros. El aparato produce neutrones rápidos por bombardeo de un blanco de tritio mediante un haz de deuterones acelerados intermitentemente, y las interacciones de los neutrones con el material del medio proporcionan información sobre la perforación.

En una de estas aplicaciones, se miden los rayos gamma producidos por la difusión inelástica de los neutrones, y a partir de este análisis se obtiene información acerca de la presencia de carbono, el principal constituyente del petróleo y del gas. En otra aplicación, los detectores de neutrones se utilizan para medir la duración del pulso de neutrones lentos que se produce cuando los neutrones inicialmente rápidos del acelerador encuentran hidrógeno en el material circundante. La rápida desaparición del pulso de neutrones lentos sugiere que el hidrógeno de la región está acompañado por cloro, el cual es muy eficaz capturando neutrones, lo que indica

la presencia de agua salada. Un pulso de larga duración indica que el cloro no está presente, lo cual proporciona un buen sistema para detectar depósitos de petróleo. La sensibilidad de estas técnicas nucleares, así como de otras afines, ayuda a identificar regiones que contienen gas o petróleo que de otra forma pasarían desapercibidas.

Siempre que los esfuerzos de investigación y desarrollo conducen a un aumento de eficacia de las tecnologías energéticas existentes, se produce un ahorro de energía. En esos casos, el impacto de la física nuclear se nota de varias maneras. Por ejemplo, las técnicas de trazado han sido utilizadas para estudiar la fricción y el desgaste en los motores de gasolina mediante la incorporación de carbono radiactivo en los aros de acero de los pistones. La inhibición de la fricción y el desgaste —y por lo tanto, el aumento de la eficiencia— pueden conseguirse a menudo mediante el método de la implantación de iones para modificar las propiedades superficiales de los materiales. Los moldes para fabricar alambre que han sido implantados con nitrógeno (a un coste de sólo unos cuantos dólares por molde) pueden ser mantenidos en servicio un tiempo aproximadamente cinco veces mayor que el normal, con el consiguiente ahorro en costes de utillaje y otros costos.

La implantación de iones también es un sistema prometedor en la fabricación de aleaciones superficiales resistentes a la corrosión, ya que su uso permitirá ahorrar metales raros o estratégicos como el cromo, el platino, el cobalto y el tungsteno. El ahorro no sólo se produce a través de la reducción de la corrosión, sino también gracias a la implantación selectiva de estos escasos elementos en la superficie del material —precisamente donde se necesitan para la resistencia a la corrosión—, mediante los aceleradores nucleares.

Los esfuerzos de los metalúrgicos y de otros expertos en este campo para comprender los efectos de la radiación intensa en las propiedades estructurales de los materiales, así como para diseñar nuevos materiales que puedan ser utilizados en los reactores de fusión y fisión, están íntimamente relacionados con los estudios que se han mencionado anteriormente. El estudio de los materiales que contienen residuos y la erosión y debilitamiento de los materiales de los reactores debido a la irradiación por neutrones, protones y partículas alfa constituyen algunos ejemplos de los problemas que deben ser investigados. Tales estudios ya han ayudado a iden-

tificar técnicas metalúrgicas para minimizar la dilatación a altas temperaturas y el debilitamiento de los bordes. También se están utilizando para estudiar posibles maneras de disminuir los daños producidos por la irradiación a base de someterlos a una preirradiación controlada o a la radiación ambiente del propio reactor.

BELLAS ARTES

Las técnicas nucleares basadas en el uso de radiactividades inducidas por neutrones en los objetos de arte con el fin de determinar su composición química, y por lo tanto determinar su origen, están siendo utilizadas desde hace tiempo. No obstante, recientemente, la irradiación completa por neutrones de pinturas, seguida de una autorradiografía, ha demostrado ser una valiosa técnica para estudiar capas subyacentes de pintura, las cuales sirven para estudiar la evolución de las pinturas de los grandes (y no tan grandes) maestros. Esta técnica consiste en una serie de exposiciones radiográficas durante períodos de varios días después de haber realizado una irradiación por neutrones. Debido a las diferencias en las vidas medias de los elementos radiactivos tales como el manganeso, el sodio, el cobre, el arsénico, el mercurio y el antimonio, es posible observar selectivamente las distintas imágenes contenidas en las abundantes capas de pintura que posee una típica pintura al óleo.

En un programa llevado a cabo por el Museo Metropolitano de Arte de Nueva York, se examinaron muchas pinturas de grandes maestros como Rembrandt, Hals, Van Dyck y Vermeer. Muchas revelan no sólo una sino varias imágenes escondidas y desconocidas (v. fig. 6-3), las cuales revelan la evolución de la composición de la pintura así como los pensamientos y estados de ánimo del artista.

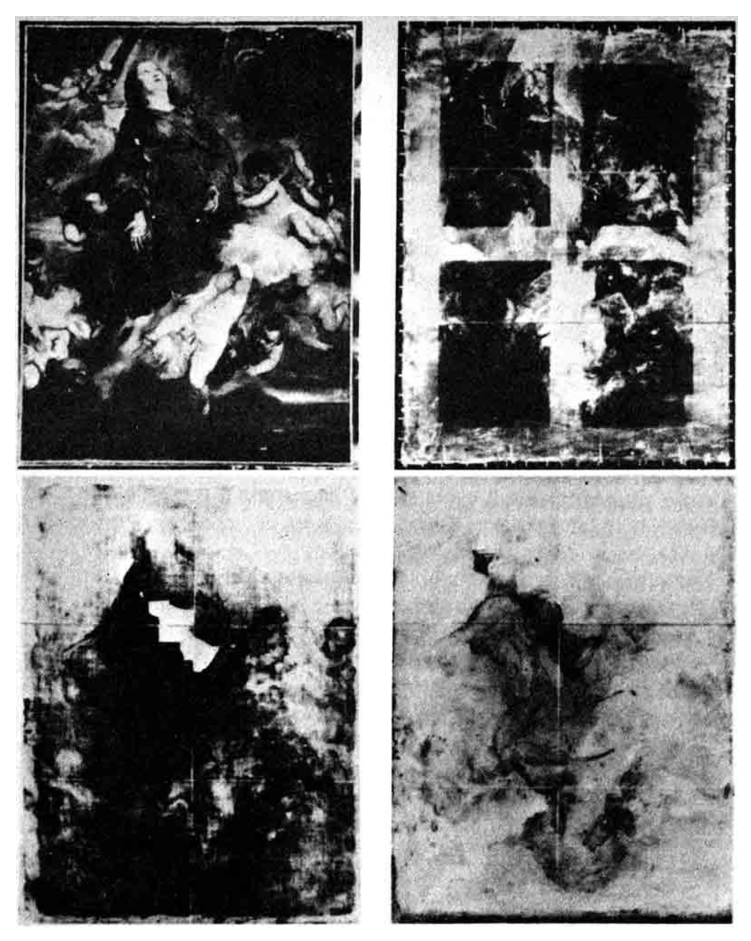


Fig. 6-3. *Santa Rosalía intercediendo por la plaga caída sobre Palermo,* por A. Van Dyck. Arriba a la izquierda se muestra una fotografía convencional del óleo. Arriba a la derecha se muestra una radiografía con rayos X, la cual revela indicios de una pintura escondida detrás. Esta imagen del cuadro oculto aparece con mayor claridad en las dos autorradiografías con neutrones que aparecen abajo. La pintura escondida resultó ser un autorretrato. (Cortesía del Museo Metropolitano de Arte de Nueva York y el Laboratorio Nacional de Brookhaven.)

TERCERA PARTE

FRONTERAS ACTUALES DE LA FÍSICA NUCLEAR

7. El plasma de quarks y gluones

Hace unos 20.000 millones de años, el Universo empezó con una fantástica explosión denominada *Big Bang*. En aquel instante, se cree que la materia tenía una temperatura equivalente a unos 10^{19} G*e*V, o 10^{32} °K. Durante los primeros momentos después de la gran explosión (mucho menos de 1 segundo), las fuerzas fundamentales que se conocen hoy día —fuertes, electrodébiles y gravitación— eran, según las actuales teorías, comparables en intensidad. Ninguna de las múltiples partículas compuestas —los mesones y los bariones— existían, puesto que no podrían haber sobrevivido a este calor inimaginable. Solamente los leptones elementales, quarks, gluones, fotones y bosones vectoriales intermediarios podrían haber existido.

A medida que el tiempo transcurrido se iba acercando al primer segundo, el naciente Universo se expansionaba y, por lo tanto, empezaba a enfriarse. Unos $10^{\sim 10}$ segundos después de la gran explosión, con una temperatura del Universo de unos 10^{3} G*e*V (10^{16} °K), empezó a desaparecer la unidad entre la fuerza débil y la electromagnética. Los quarks (y sus antiquarks) todavía estaban libres y no se habían ligado en forma de hadrones. Posteriormente, entre unos 6×10^{-6} y 7×10^{-6} segundos, cuando el Universo se hubo enfriado hasta llegar a una temperatura comprendida entre 100 y 200 M*e*V ($l\times10^{12}$ a 2×10^{12} °K), los quarks y antiquarks empezaron a fusionarse para formar partículas que interaccionaban fuertemente (mesones y bariones). A medida que el Universo continuaba enfriándose, los propios nucleones empezaron a fusionarse para formar núcleos ligeros. Esta nucleosíntesis empezó alrededor de tres minutos después de la gran explosión, lo que dio lugar al proceso conducente de la formación de estrellas y galaxias.

Actualmente el Universo es relativamente frío, con una temperatura global de 3°K. Para investigar el universo durante los primeros microsegundos se necesita, por lo tanto, volver hacia atrás en el tiempo, e intentar recrear las condiciones que existieron entonces. Las herramientas de que se dispone son los descendientes de la propia gran explosión; es decir, los abundantes elementos pesados que nos rodean, los cuales se formaron hace mucho tiempo en las estrellas. El sistema a seguir es acelerar tales núcleos

hasta energías relativistas extremas y aplastarlos entre sí, teniendo en cuenta que para energías de colisión suficientemente grandes, la temperatura y la presión serán tan grandes que los nucleones se desintegrarán en una densa y llameante bola de fuego de quarks y gluones.

Este proceso, denominado *desconfinamiento de los quarks,* nunca ha podido ser observado desde la Tierra, pero podría ocurrir en los núcleos de las estrellas de neutrones. El estudio del desconfinamiento de los quarks proporcionará información sobre cuestiones de gran interés cosmológico y al mismo tiempo permitirá obtener una restrictiva serie de comprobaciones sobre la cromodinámica cuántica (QCD). Durante el desconfinamiento de los quarks se creará un nuevo estado de la materia, el plasma *quark-gluon.* En este estado, los quarks y los gluones ya no están confinados en el interior de hadrones individuales sino que se encuentran contenidos en el interior de un volumen mucho mayor; esto permitirá examinar el comportamiento de largo alcance de la QCD, el cual no es muy bien conocido en la actualidad.

Este capítulo trata de los diversos estados de la materia nuclear, el valor de las temperaturas o densidades que se requieren para alcanzar el desconfinamiento de los quarks (basados «n los modelos teóricos actuales), y las rúbricas detectables que dejará detrás suyo el plasma quark-gluon. Finalmente, se incluye una breve discusión sobre otras fronteras de la física de los iones pesados relativistas.

ESTADOS DE LA MATERIA NUCLEAR

Si se coloca un cubo de hielo en una placa caliente, primero se funde para dar agua, la cual representa un estado de energía más elevado que el hielo. Después de calentarse algo más, el agua se evapora hasta llegar a un estado más alto, el vapor de agua. Estos cambios se denominan *transiciones de fase.* En cada cambio de fase, la energía interna (por molécula) aumenta, y aparece un aspecto diferente de la estructura del objeto. De un modo análogo, se espera calentar la materia nuclear ordinaria hasta temperaturas suficientemente altas para crear un estado de energía extrema, el plasma quark-gluon.

¿Cuáles son las fases posibles de la materia nuclear? Las investigaciones realizadas hasta el momento, que utilizan colisiones nucleares cuya

energía está por debajo de los 100 M*e*V por nucleón, estudian en un principio el estado fundamental de la materia nuclear fría. Incluso los haces de núcleos pesados de más alta energía de los que se dispone actualmente son incapaces de producir un plasma de quarks y gluones completamente desarrollado.

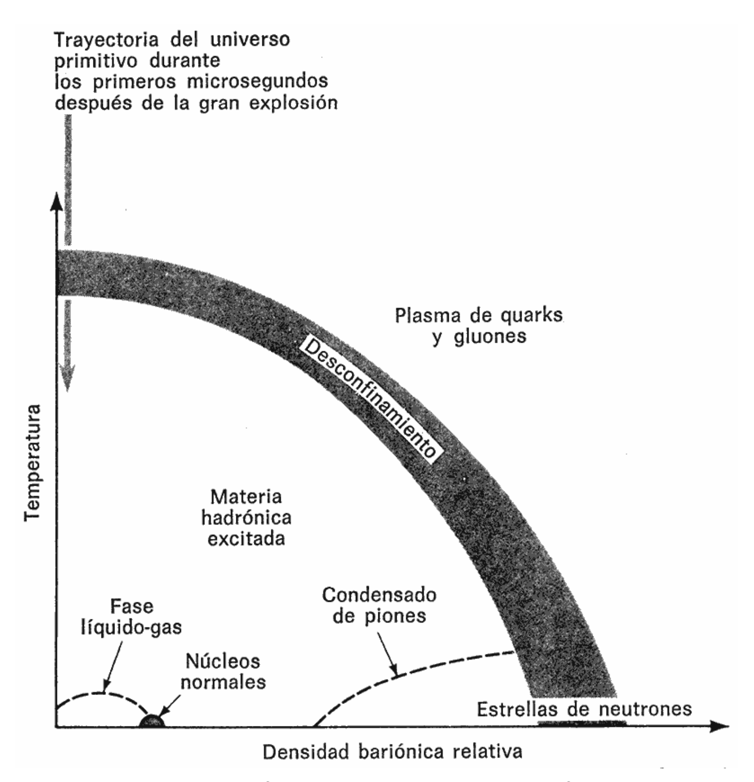


Fig. 7-1. En este diagrama de fases se muestran algunas de las fases de la materia nuclear que se espera existan a altas temperaturas y densidades diferentes. La banda sombreada representa esquemáticamente la región de transición para el desconfinamiento de los quarks, más allá de la cual se encuentra el plasma de quarks y gluones. Los objetivos de la física nuclear conocida se encuentran confinados casi por completo a los núcleos bajo condiciones normales.

La figura 7-1 ilustra alguna de las fases posibles de la materia nuclear en términos de dos variables: temperatura y densidad relativa de bariones, es decir, el número de bariones —principalmente protones y neutrones— por unidad de volumen, comparado con el mismo valor para los núcleos ordinarios. Los núcleos normales, de los cuales están compuestos todos los objetos de la Tierra, se encuentran únicamente en una pequeña región de este diagrama de fases. Existen regiones mucho mayores en él, cada una de las cuales corresponde a las diferentes fases en las que puede existir la materia nuclear. Se hará referencia a estas fases como *materia hadrónica,* la cual engloba a los núcleos normales y el plasma quark-gluon, o simplemente *materia de quarks* (situada más allá de la región sombreada en la que se produce el desconfinamiento de los quarks).

A densidades nucleares normales y bajas temperaturas (cercanas a los 0 M*e*V de materia nuclear fría), encontramos los núcleos que constituyen el mundo cotidiano. A medida que se calienta el núcleo de los objetos mediante colisiones, los nucleones individuales ganan energía y tratan de separarse, lo que origina que el sistema nuclear se haga cada vez mayor y su densidad disminuya inmediatamente. Por lo tanto, para temperaturas ligeramente más elevadas, pero a densidades por debajo de lo normal, puede producirse una transición de fase *líquido-gas* en la que los núcleos se convierten en nucleones. Las colisiones de iones pesados cuya energía es inferior a 100 M*e*V por nucleón y las colisiones de alta energía protón-núcleo, en las cuales el protón incidente deja una *mancha caliente* local en el núcleo (la cual se propaga a través suyo, calentándolo), se utilizan habitualmente para sondear esta transición de fase.

A densidades bariónicas elevadas y temperaturas relativamente altas se postula la existencia de nuevas y poco usuales fases de la materia nuclear. Una de éstas, denominada *condensado de piones,* sería una forma altamente ordenada de la materia nuclear, análoga a los átomos de una red cristalina. Todavía no se ha encontrado una evidencia positiva de su existencia, pero podría existir en el interior más profunda de las estrellas de neutrones. A densidades elevadas, se entra en una región que es característica de las estrellas de neutrones. Parece irónico que con el objeto de obtener información sobre alguno de los objetos más masivos que se conocen (las estrellas) se tenga que estudiar los objetos más pequeños que se conocen (los núcleos).

A temperaturas elevadas (20 a 100 M*e*V) del medio nuclear, se producen muchos estados excitados de los propios nucleones, cuya materia nuclear en esos casos se denomina *materia hadrónica excitada.* Si los nucleones carecieran de estructura interna, este estado de la materia continuaría de forma indefinida, pues en principio pueden producirse un número infinito de estados excitados.

Los nucleones están compuestos de quarks y gluones, y en cuanto se aumente suficientemente la temperatura o la densidad se puede producir una transición en la cual la materia hadrónica deje de estar desconfinada, es decir, los nucleones se descomponen en un plasma de quarks y gluones semejante al que dio lugar a los mesones y bariones unos cuantos microsegundos después de la gran explosión. Por lo tanto, *existe* una estructura interna.

EL DESCONFINAMIENTO DE LOS QUARKS

Los haces nucleares relativistas se utilizarán para el estudio del plasma quark-gluon. ¿Cuáles son los parámetros físicos apropiados y los valores críticos que se necesitan para describir este estado? El único medio posible consiste en acelerar los núcleos pesados hasta elevadas energías enormes y provocar su colisión frontal. En este impacto catastrófico, se espera que se creen elevadas temperaturas y densidades en un volumen de espacio comparable al de los propios núcleos. Cuanto mayor sea el núcleo que se utiliza, mayor número de colisiones individuales se producirán, ayudando cada una de ellas a calentar y, hasta cierto punto, a comprimir el sistema. Idealmente, por lo tanto, la instalación adecuada para tales instrumentos debería ser capaz de acelerar núcleos tan pesados como el de uranio.

Se han realizado estimaciones de los valores críticos de la temperatura y de la densidad necesarias para el desconfinamiento de los quarks. Cálculos sencillos basados en la compresión de los núcleos hasta que el espacio entre los nucleones individuales desaparezca predicen que el desconfinamiento debería ocurrir cuando se alcanzara una *densidad bariónica* crítica que sólo es unas pocas veces superior a la de la materia nuclear normal si las temperaturas son suficientemente grandes. (La densidad normal de materia nuclear es de 0,16 nucleones por fermi cúbico.) Otros cálculos, que reflejan un punto de vista diferente del tamaño efectivo de los nucleones,

proporcionan valores sustancialmente mayores para el valor crítico de la densidad bariónica. Sin embargo, se espera que tenga lugar un cambio fundamentalmente importante en la naturaleza de la materia nuclear a una densidad bariónica relativamente baja, concretamente cuando los nucleones sean estrujados entre sí.

Una aproximación alternativa consiste en rellenar el espacio entre nucleones mediante la creación de mesones (por ejemplo, piones y kaones) y otras partículas, tales como parejas de protón-antiprotón, durante el proceso de colisión. Tales argumentos conducen a la predicción de que bastaría superar una *energía crítica* (la cantidad de energía por unidad de volumen que reside en el sistema), que es unas pocas veces mayor que la de la materia nuclear, para lograr el desconfinamiento de los quarks de los hadrones. [La densidad de energía de la materia nuclear es de 0,15 G*e*V por fermi cúbico (G*e*V/fm^3).]

Estas simples estimaciones están apoyadas por sofisticados cálculos teóricos, los cuales predicen los siguientes valores críticos para la transición a un plasma quark-gluon: una temperatura entre 140 y 200 M*e*V y una densidad de energía que sobrepase los 0,5 G*e*V por fm^3. La demanda de energías de bombardeo mucho más altas que las disponibles en los aceleradores de iones pesados actuales proviene del hecho que sólo con energías tan elevadas será posible alcanzar las extremas temperaturas y densidades de energía necesarias para desconfinar la materia hadrónica y producir un plasma.

La base de los cálculos mencionados anteriormente lo constituye una técnica matemática denominada *teoría reticular de aforo*, la cual ha procurado valiosos conocimientos en muchas áreas de la física. Se basa en el hipotético concepto de una red regular de puntos en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones. En cada punto, y a lo largo de cada conexión entre los puntos, se define alguna propiedad física del sistema (en este caso, de un sistema de partículas fuertemente interactivas). Utilizando los conceptos de la teoría de grupos (la matemática de las operaciones de simetría) y sofisticados métodos numéricos de cálculo, es posible averiguar los valores de estas propiedades para un espaciado dado del cristal. A medida que este espaciado se reduce gradualmente, es decir, a medida que el cristal se «encoge» indefinidamente, los valores de las propiedades físicas convergen hacia aquellos que la QCD predice para el límite continuo del espacio-tiempo real. Gracias al artificio del cristal, un cierto número de teóricos

han podido realizar un amplio rango de cálculos que de otra manera hubieran sido imposibles. Tales cálculos han dado lugar a la predicción del desconfinamiento.

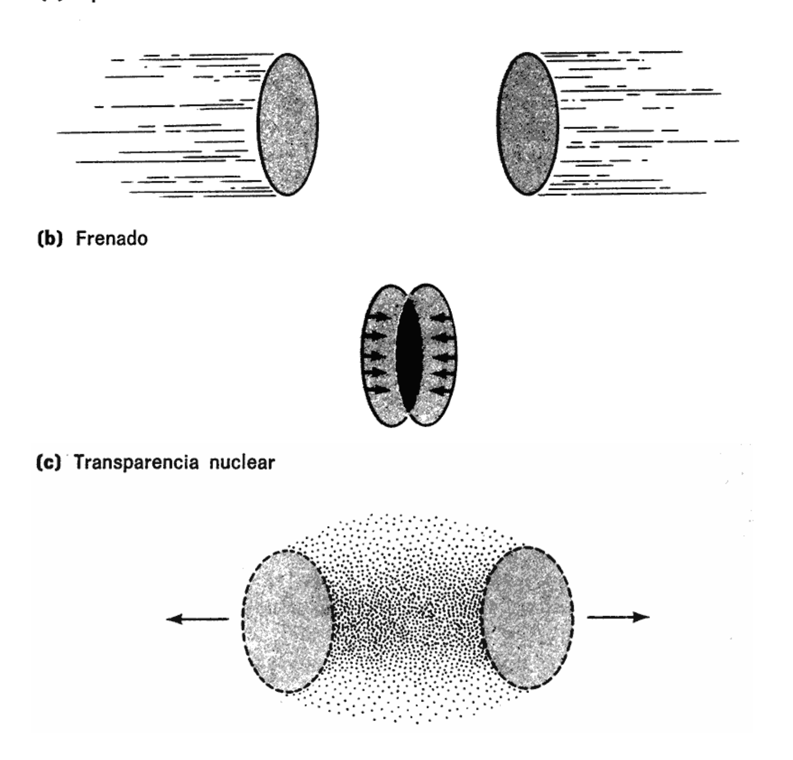
En la actualidad, existen dos indicios experimentales de que realmente se puede conseguir el desconfinamiento de los quarks. El primero de ellos lo proporcionan los eventos de rayos cósmicos de alta energía registrados por el Japanese-American Cooperative Emulsión Experiment (JACEE). En este experimento, se transportan mediante globos emulsiones nucleares (similares a las de las películas fotográficas) hacia la cima de la atmósfera de la Tierra, con el objeto de interceptar núcleos pesados de alta energía en la radiación cósmica antes de que sean destruidos por las interacciones con los núcleos presentes en las moléculas del aire. Unos pocos rayos cósmicos colisionan con núcleos de plata o bromo de la emulsión, y sus trazas, así como las de los productos de la interacción, pueden ser vistas y medidas una vez que se ha revelado la emulsión (de forma similar a la película de una cámara).

Durante uno de estos experimentos, se estimó que el núcleo de silicio responsable poseía una energía de 4.000 a 5.000 G*e*V por nucleón, lo cual desencadenó una explosión en la que el número de partículas producido (alrededor de 1.000, piones en su mayoría) indicó que la densidad de energía era de unos 3 G*e*V/fm^3, varias veces el valor estimado que se necesita para provocar el desconfinamiento de los quarks. Sin embargo, es imposible decir, a partir de un único ejemplo, si se produjo el desconfinamiento. Investigaciones detalladas de este fenómeno requerirán haces acelerados, los cuales, a diferencia de los rayos cósmicos, pueden ser controlados. Para que los resultados de este tipo de experimento de acelerador puedan ser interpretables y estadísticamente correctos, se necesita registrar un gran número de situaciones similares, y se requiere un ritmo de una colisión frontal por segundo. (Por el contrario, los registros de rayos cósmicos de esta naturaleza son tan raros que se utilizan de forma individual.)

El segundo indicio procede de los experimentos efectuados por el European Muon Collaboration/Stanford Linear Accelerator Center sobre difusión profundamente inelástica de leptones por núcleo, que sondearon la estructura de quarks de los nucleones ligados en los núcleos (se ha hecho referencia a este trabajo en el capítulo 3). Los resultados parecen indicar que los quarks pueden moverse más libremente en los nucleones que se encuentran en los núcleos que en los que están libres. Si esto fuera cierto,

el desconfinamiento de los quarks podría ocurrir para valores de la temperatura y densidad de energía incluso más bajos de los estimados habitualmente.

¿Cuáles son las energías de los haces nucleares que se necesitan para desconfinar a los quarks de la materia hadrónica, es decir, qué energías producirán temperaturas y densidades suficientes? La respuesta depende del intento de maximizar la densidad bariónica o de alcanzar una densidad de energía muy elevada en el proceso de colisión. Para maximizar la densidad bariónica, la energía debería ser tal que un núcleo frenara al otro, de manera que se alcanzara una compresión máxima (v. fig. 7-2). Las estimaciones teóricas actuales sugieren que esto ocurrirá en el caso de energías de bombardeo de laboratorio de 10 G*e*V por nucleón.



◄ **Fig. 7-2.** El desconfinamiento de los quarks en las colisiones nucleares relativistas puede tener lugar en dos regímenes distintos que se muestran en (b) y (c). (b) En una colisión frontal a bajas energías (sobre una escala relativa), los dos núcleos se frenan mutuamente, produciendo un plasma de quarks y gluones bajo condiciones de máxima compresión nuclear y, por lo tanto, de máxima densidad bariónica. (b) A energías mayores, los núcleos son transparentes a medida que se interpenetran produciendo, en la región central, un plasma de quarks y gluones bajo condiciones de densidad de energía extremadamente alta y relativamente baja densidad bariónica.

Por otro lado, si se desea una densidad de energía muy elevada, se necesitan altas energías de bombardeo. El camino más eficaz para conseguir este propósito consiste en construir un acelerador colisionador de iones pesados (diferente de una máquina de blanco fijo). Para alcanzar la densidad de energía deseada se requerirá un *colisionador nuclear relativista* que posea una energía del orden de 30 G*e*V por nucleón en cada haz. En este caso, el impacto de las colisiones frontales es tan elevado que los dos núcleos exhiben *transparencia nuclear*, es decir, se interpenetran explosivamente. En este fenómeno se crean tres regiones diferenciadas: las dos regiones ricas en bariones (vestigios de los dos núcleos proyectil, consistentes en nucleones recondensados), los cuales se alejan de la zona de colisión con velocidades opuestas, y la región central, donde la densidad de altas energías se producirá en forma de creación de mesones, de parejas barión-antibarión, de pares quark-antiquark y de gluones.

DETECCIÓN DEL PLASMA QUARK-GLUON

El proceso completo de formación y recombinación del plasma quark-gluón empleará unos 10^{-22} segundos, lo que es comparable con el tiempo que emplea la luz en atravesar un núcleo individual. Durante este período, el plasma inicialmente caliente se expansionará y enfriará (por emisión de partículas) para recondensarse finalmente en una fase hadrónica normal, es decir, los usuales mesones y bariones que se observan en los experimentos de los aceleradores.

Para detectar la presencia del plasma, se pueden buscar partículas que, o bien se originan en la fase primera, densa y caliente, o que aparecen en una fase posterior, más fría y enrarecida. Si se desea observar el ardiente corazón del plasma, es necesario detectar partículas que puedan escapar incólumes de este ambiente hostil. Los únicos candidatos viables a este

proceso son los leptones —que no están sujetos a la fuerza fuerte y por lo tanto únicamente interactúan electrodébilmente con los hadrones del plasma— y los fotones. Por otro lado, la fase «congelada» de las colisiones (es decir, cuando los quarks y los antiquarks vuelven a condensarse en hadrones) ofrece un cierto número de señales entre los hadrones, incluyendo partículas extrañas (hadrones que contienen el quark extraño) y antibariones, los cuales reflejan la composición quark-antiquark del plasma. Las fluctuaciones poco comunes de los números de partículas podrían constituir también una señal de la formación del plasma quark-gluon. Finalmente, se debería tener en cuenta que la observación de quarks libres o combinaciones poco usuales de quarks indicarían la formación del plasma quark-gluon e iniciaría el estudio de la *química de los quarks.*

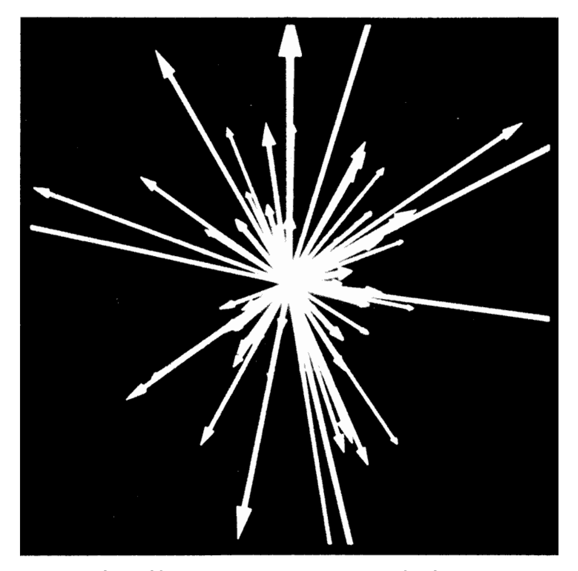


Fig. 7-3. Reconstrucción gráfica por computador de un fenómeno individual, mostrado en el sistema de referencia del haz colisionante, sobre un experimento de blanco fijo en el que un haz de núcleos de niobio-93 a 650 M*e*V por nucleón bombardean un blanco de niobio. Las flechas pequeñas representan los núcleos proyectil y blanco acercándose mutuamente. La longitud de cada flecha que surge del punto de colisión es proporcional al momento por nucleón de la partícula que representa. En total, se observaron 61 partículas cargadas en este fenómeno. (Cortesía de la Colaboración GSI/LBL, Lawrence Berkeley Laboratory.)

Algunas de las interacciones que se produzcan en un colisionador nuclear relativista provocarán la aparición de centenares —incluso miles— de partículas en un único choque. Estas partículas se materializarán a partir de la energía disponible en las violentas colisiones. (Un ejemplo de la multiplicidad de partículas que se observan en los habituales experimentos de blanco fijo a energías cercanas a las relativistas se puede observar en la fig. 7-3). La capacidad de los detectores que se necesitan para tales experimentos deberá ser mayor que la de los detectores que se usan en colisiones protón-protón o protón-antiprotón, cuya energía es incluso mayor. Consideremos, por ejemplo, una colisión frontal de dos núcleos de uranio, cada uno con una energía de 30 G*e*V por nucleón. Si *toda* la energía disponible se convirtiera en masa, se crearían más de 100.000 piones —un número de partículas sin precedente en el estado final —. Si se supone, de forma más objetiva, que estas partículas son emitidas con una energía característica promedio de 200 M*e*V, el número total de piones caerá hasta un valor de unos pocos miles —un número todavía enorme para que los futuros detectores puedan actuar a pleno rendimiento.

Debido a las elevadas multiplicidades de las partículas, muchos detectores deberán utilizar técnicas basadas en la *calorimetría,* en la que se mide el flujo total de energía en lugar del número total de partículas. Al mismo tiempo, se construirán algunos detectores que sean «ciegos» para detectar una vasta mayoría de partículas, pero que sean capaces de ver y registrar algún tipo específico de ellas (por ejemplo un detector de leptones solamente) en números tratables. Los experimentos marcarán sin lugar a dudas el uso de las combinaciones de estos dos tipos de detectores.

El camino hacia el plasma quark-gluon requerirá un acelerador adecuado, y se necesitarán grandes redes de detectores para desvelar sus misterios. Estas herramientas científicas permitirán revisar el pasado, hasta el momento de la creación y hasta un nuevo (para nosotros) estado de la materia, el plasma quark-gluon. La confirmación de su existencia tendría un gran impacto sobre cuestiones fundamentales comunes a la física nuclear, a la física de partículas, a la astrofísica y a la cosmología, y su éxito representaría sin lugar a dudas uno de los más interesantes de la historia de la ciencia.

PROBLEMAS ADICIONALES DE LA FÍSICA DE LOS IONES PESADOS RELATIVISTAS

Aunque uno de los focos principales de investigación mediante los colisionadores nucleares relativistas lo constituirá el plasma de quarks y gluones, existen muchos problemas físicos que pueden ser investigados con un acelerador. Sin duda, algunas de estas cuestiones deben estar presentes en cualquier programa cuyo objetivo sea establecer y clasificar las propiedades del plasma de quarks y gluones. Como tales, formarán parte de la física básica del programa de colisiones relativistas núcleo-núcleo y abarcarán un amplio rango de estudios. Unos cuantos ejemplos servirán para ilustrar este punto.

A partir del diagrama de fases de la materia nuclear, se puede apreciar que, además del plasma quark-gluon, existe un amplio campo sin explorar. Las investigaciones sobre la materia hadrónica excitada acaban justo de empezar, con el estudio de las colisiones protón-núcleo y núcleo-núcleo a energías muy altas. En las colisiones frontales núcleo-núcleo relativistas, debería ser posible crear temperaturas de la materia nuclear lo bastante altas como para producir un gran número de resonancias bariónicas: estados bariónicos masivos de vida muy corta que se desintegran dando lugar a otros bariones y mesones. Las más importantes serían las *resonancias nucleónicas*, o estados N*, las cuales corresponden a estados altamente excitados de los nucleones y las *resonancias delta*, las cuales también son estados bariónicos excitados. Cada una de las resonancias delta existe en forma de cuatro variedades distintas que poseen cargas eléctricas –1, 0, +1 y +2, debido a sus diferentes configuraciones de quarks.

La creación y estudio de tales N* o de la materia delta es importante no sólo por su interés intrínseco, sino porque representan una fase de transición entre la materia nuclear normal y el plasma de quarks y gluones. Aunque pueden obtenerse resonancias barió- nicas individuales con los aceleradores existentes, bien como especies libres, bien como estados ligados de los núcleos, sólo es posible producir un gran número de ellas de forma simultánea, y que estén suficientemente cerca, mediante colisiones frontales relativistas, de un núcleo con otro núcleo. Las consecuencias de esta situación única son difíciles de predecir. En un principio se podrían formar sistemas metastables con esta materia nuclear exótica que serían

análogos a los núcleos: un estado delta-16, por ejemplo, similar al oxígeno-16. También se ha sugerido que en las desexcitaciones N* o de los delta podría observarse una súbita erupción de piones, posiblemente en forma de un haz de piones. Esta y otras ideas sobre la materia hadrónica excitada son altamente especulativas, pero sugieren un programa de investigación experimental estimulante y potencialmente fructífero.

En recientes experimentos con iones pesados a energías de unos pocos centenares de M*e*V por nucleón (en el centro de masas), el número de piones creados que pueden observarse es significativamente menor de lo esperado. Una interpretación sostiene que se trata de un indicio de los efectos de compresión, es decir, la mayor parte de la energía cinética de los núcleos que colisionan se invierte aparentemente en la compresión de la materia nuclear en lugar de la creación de piones. ¿Persiste este efecto a altas energías? Y si es así, ¿es la compresión nuclear la explicación correcta?

Para investigar de forma exhaustiva éstas y otras cuestiones de la física de la materia hadrónica excitada se requerirá no sólo que el acelerador sea capaz de proporcionar el espectro completo de haces nucleares sino también que se pueda modular su energía. Esto es necesario para ver cómo cambia un proceso físico dado al aumentar la energía, lo que proporciona una base experimental para extender la teoría de la materia nuclear. Además de operar mediante colisiones de haces, el acelerador debería ser capaz de operar con blancos fijos, para aprovechar las ventajas que ofrece este modo para otros tipos de experimentos. Este sistema de operación podría conseguirse, bien extrayendo uno de los dos haces que circulan en sentido contrario del colisionador o bien utilizando un sincrotrón adicional (que trabajara con energías efectivas menores), el cual debería actuar como el *inyector* del colisionador.

Una característica importante de los experimentos de blanco fijo a energías relativistas es que las partículas producidas durante las colisiones quedan localizadas dentro de un cono dirigido hacia delante y situado alrededor del eje del haz que es cada vez más delgado. Esta fuerte colimación del haz de partículas puede ser utilizada provechosamente en muchos experimentos de física nuclear. Un ejemplo de este uso se encuentra en la producción de núcleos que se obtienen lejos del valle de estabilidad, es decir, formas exóticas de la materia nuclear convencional. Aquí, el interés principal se centra en las colisiones periféricas o rasantes, en las que sólo

participan unos cuantos nucleones del blanco y del proyectil. En tales colisiones pueden arrancarse unos cuantos nucleones proyectil, dando lugar a un sistema nuclear de alta energía que se mueve hacia delante. En una pequeña proporción de las interacciones, los nucleones que son eliminados pueden ser, en su mayor parte, protones o en su mayor parte neutrones, produciendo, respectivamente, núcleos muy ricos en protones o en neutrones.

En los últimos años se han descubierto más de 20 nuevos núcleos en tales reacciones. Esta técnica permitirá dotar a los físicos de una red en expansión de núcleos radiactivos cuyas propiedades (por ejemplo, masas y vidas medias) poseen un interés intrínseco. Por otra parte, estos núcleos pueden ser utilizados como haces proyectil para estudiar los mecanismos de las reacciones nucleares en los procesos que son importantes para la propagación de rayos cósmicos y en las abundancias observadas de los elementos de la radiación cósmica. También tienen aplicaciones potencialmente valiosas en radiobiología y medicina nuclear.

Unos pocos ejemplos finales —fuera del campo de la física nuclear, pero accesible con un acelerador nuclear relativista de blanco fijo— pueden encontrarse en la física atómica. Si se aceleran átomos parcialmente ionizados hasta energías suficientemente altas, se puede eliminar selectivamente la mayor parte o casi todos los electrones restantes. Por ejemplo, acelerando un haz de uranio-238 con carga +68 ($^{238}U^{68+}$) hasta llegar a unos cuantos centenares de M*e*V por nucleón y haciéndolo pasar a través de una delgada lámina, puede obtenerse mayoritariamente $^{238}U^{91+}$, el cual sólo posee un electrón, es decir, se trata de uranio hidrogenoide. Una vez preparado este haz, se pueden estudiar los esquemas atómicos de relajamiento de estos poco usuales iones pesados, lo cual proporciona potentes y nuevas comprobaciones de la precisión electrodinámica cuántica. Otras posibilidades incluyen la difusión de un haz de radiación láser por un haz muy intenso de iones que se mueve paralelamente. Los cálculos teóricos parecen sugerir que, bajo las condiciones adecuadas, podría producirse un láser de rayos X a partir de la interacción.

Los estudios señalados anteriormente son sólo un esbozo del gran potencial de logros científicos que puede proporcionar un colisionador nuclear relativista además de su utilización para producir un plasma de

quarks y gluones. La extensión de estas capacidades dependerá de la imaginación y el ingenio de muchos físicos procedentes de una gran variedad de disciplinas.

8. Nuevas descripciones de la materia nuclear

En el capítulo anterior se ha hecho referencia a las interesantes propiedades proporcionadas por las colisiones nucleares relativistas para producir en el laboratorio una forma de materia no observada anteriormente y cuyas propiedades son de importancia fundamental para comprender las fuerzas básicas de la materia y los primeros momentos de evolución del Universo. Mientras se persigue este objetivo, es esencial recordar que todavía no se han asimilado totalmente muchas propiedades de la materia nuclear bajo condiciones más convencionales. Una mejor descripción de la materia nuclear representaría un singular avance sobre la cuestión más difícil e importante de la física: ¿Cómo construye la naturaleza estructuras estables a partir de bloques elementales más pequeños?

Se sabe que los bloques más elementales de los núcleos están formados por quarks y gluones. Sin embargo, el problema de la descripción total de la materia nuclear en términos de quarks y gluones están fuera de lugar en este momento. La teoría fundamental de la interacción fuerte, la cromodinámica cuántica (QCD), no puede resolverse cuando los quarks están separados por distancias comparables al tamaño del nucleón. Por lo tanto, la QCD indica la existencia —pero no proporciona ningún tratamiento práctico— de la crucial región de transición entre el régimen de distancias cortas, donde es evidente la fuerza de color entre quarks y gluones, y la región de confinamiento donde está tapada por el intercambio de mesones entre bariones.

¿Es importante el régimen quark-gluon a cortas distancias para la descripción de la materia nuclear ordinaria, o los neutrones y protones permanecen lo bastante separados como para que sus subestructuras nunca estén afectadas significativamente? Si esto último es cierto, ¿puede desarrollarse una teoría cuántica de campos adecuada para el barión-mesón, es decir, las interacciones hadrónicas —«la hadrodinámica cuántica» (QHD) —, capaz de describir la influencia sustancial del intercambio de mesones dentro del sistema nuclear de muchos cuerpos? Estas son las cuestiones centrales que

deben plantearse en cuanto al desarrollo de teorías de física nuclear se refiere.

Una parte importante del programa experimental se llevará a cabo con el Acelerador Continuo de Haces de Electrones de 4 G*e*V (CEBAF) propuesto por la Asociación para la Investigación de las Universidades del Suroeste. Los energéticos electrones interactuarán de manera bien conocida con las partículas relevantes para cada posible nivel *de* descripción de los núcleos y deberían, por lo tanto, resultar de gran ayuda para revelar los papeles relativos de los nucleones, mesones y quarks. Experimentos con otros aceleradores utilizarán haces con protones de varios G*e*V para sondear los aspectos de corta distancia de las interacciones nucleón-nucleón en el interior y en el exterior de los núcleos. Se utilizarán intensos haces de mesones de energía intermedia para implantar bariones inusuales en los núcleos, así como colisiones protón-antiprotón de baja energía estudiarán el fenómeno de aniquilación de partículas a corta distancia bajo la influencia de la fuerza fuerte. El avance teórico girará en torno a la búsqueda de una prescripción para una transición suave desde la descripción hadrónica a la descripción quark- gluon de la materia nuclear.

Para que una teoría de muchos cuerpos tenga éxito debe mejorar, evidentemente, las explicaciones teóricas existentes sobre las propiedades detalladas de la materia nuclear ordinaria que han sido obtenidas a lo largo de muchos años de investigación sobre la estructura nuclear. Además, debe proporcionar un marco que permita comprender la evolución de las propiedades de los niveles nucleares bajo condiciones cada vez más extremas de excitación, momento angular o cociente entre el número de protones y neutrones. Por lo tanto, es importante extender los estudios actuales a las reacciones nucleares que producen estas condiciones insólitas aun cuando los experimentos no sean directamente sensibles a la presencia de otras partículas distintas de los nucleones en el interior de los núcleos.

LOS QUARKS EN LOS NÚCLEOS

Los bloques más fundamentales para construir los núcleos atómicos, los quarks, interactúan entre sí mediante el intercambio de gluones, creando, por lo tanto, mesones, bariones y, en último término, núcleos. Se conoce muy poco acerca del papel de los quarks en el núcleo como tal.

Aparte de que los quarks son *asintóticamente libres* cuando están muy cerca unos de otros, y totalmente *confinados* cuando se encuentran a grandes distancias, no se conoce casi nada más acerca de su comportamiento.

La más completa información sobre los quarks en los núcleos procede de los estudios que utilizan fotones, electrones y muones. Estudios de difusión electrónica con haces precisos e intensos, realizados en Stanford, en el MIT y en varios laboratorios japoneses y europeos han revelado muchos datos acerca de la naturaleza de la estructura de quarks de los núcleos, como es el caso de la Colaboración Europea sobre Muones, discutida en los capítulos 2 y 3. El trabajo efectuado en Stanford mostró que el protón está compuesto por tres quarks que poseen carga fraccionaria y que, sorprendentemente, interactúan débilmente cuando se sitúan suficientemente juntos dentro de la bolsa en la que están confinados. Trabajos posteriores en otros laboratorios descubrieron anomalías estructurales peculiares en los núcleos de helio-3, los cuales, aparentemente, poseen una cavidad en la región central de su distribución de materia. Este descubrimiento, así como otros similares en otros sistemas nucleares ligeros, probablemente sólo podrán ser explicados cuando se incorporen plenamente los mesones y los quarks en la descripción de la materia nuclear. Estas posibilidades serán exploradas por el futuro CEBAF.

Si los nucleones que se encuentran en el interior de un núcleo se acercan durante el tiempo suficiente para que exista una probabilidad apreciable de que se fundan entre sí para formar una bolsa que contenga seis quarks o más, la descripción de las propiedades nucleares asociadas requerirá un tratamiento explícito de los quarks y gluones. Para sondear esta posibilidad, es importante estudiar de forma sistemática las correlaciones entre los movimientos de las parejas de nucleones dentro del núcleo. Un modo eficaz de llevar a cabo estas investigaciones se basa en el uso de haces de electrones para arrancar parejas de nucleones del núcleo. Es posible estudiar las correlaciones a corta distancia entre dos cuerpos en el interior del núcleo mediante la detección del electrón difundido y los nucleones expulsados simultáneamente. Experimentos de este tipo requieren haces de electrones de alta energía capaces de transferir el momento requerido al núcleo blanco junto a un elevado factor de actividad para limpiar e identificar eficientemente los fenómenos simultáneos.

Aspectos adicionales de la interacción fuerte en la que se manifiestan los quarks pueden estudiarse mediante el conocimiento de algunas de sus

características. Por ejemplo, se sabe que la paridad no se conserva estrictamente en la difusión protón-protón. Las desviaciones débiles pero medibles, provienen de la interacción débil de muy corto alcance entre los nucleones. Con el objeto de explicar cuantitativamente las violaciones de paridad, es preciso comprender el comportamiento de las fuerzas fuerte y débil a distancias muy cortas, puesto que el efecto es producido por la acción de ambas. Experimentos recientes han sugerido que la violación de paridad es 10 veces mayor para energías de los protones de 5 G*e*V que de 50 M*e*V. La exploración y el tratamiento teórico de la región de energías intermedias debería restringir los modelos basados en la QCD, en la cual las fuerzas entre los hadrones proceden de las fuerzas que ejercen entre sí sus quarks. Los experimentos requerirían haces de protones cuyo spin estuviera polarizado, así como de gran intensidad y de alta calidad, y cuya energía fuera de unos cuantos G*e*V.

Otro programa de experimentos, relacionados con los quarks, que utiliza tales haces de protones implicaría la búsqueda de las denominadas *resonancias dibaríónicas.* Los hadrones normales se dividen en dos clases: los bariones y los mesones, que consisten respectivamente de tres quarks y de una pareja quark-antiquark confinados en el interior de una bolsa. Los modelos de quarks, sin embargo, también predicen la existencia de combinaciones más exóticas, como por ejemplo las bolsas de seis quarks, las cuales (por razones que están relacionadas con la distribución de los colores de los quarks en el interior de la bolsa) se separan rápidamente en forma de dos bariones normales. Tales objetos de seis quarks, o dibariones, podrían manifestarse como resonancias en los experimentos de difusión nucleón-nucleón a energías por encima de 1 G*e*V, es decir, con bruscas variaciones de la probabilidad de difusión al variar la energía, o en su dependencia de las orientaciones del spin de los dos nucleones.

El nuevo Anillo de Antiprotones de Baja Energía (Low-Energy Antiproton Ring: LEAR) construido en el CERN proporcionará excelentes oportunidades para un estudio avanzado de la física de seis quarks. Gracias a las colisiones protón-antiprotón, se tendrá la posibilidad de estudiar la interacción entre quarks y antiquarks de una manera sencilla. Una colisión materia-antimateria puede dar lugar a un estado intermedio de energía pura, la cual puede, subsiguientemente, dar lugar a muchos estados finales interesantes y variados, de los cuales muy pocos han sido estudiados extensivamente.

El «átomo» protón-antiprotón es especialmente interesante. Se produce cuando los protones cargados positivamente capturan un antiprotón cargado negativamente que se mueve lentamente, empujándolo hacia una órbita atómica. En este caso, se investigarían las transiciones entre los estados atómicos ligados (debidos a la fuerza de Coulomb) y los estados ligados muy profundos (debidos a la interacción fuerte), lo cual implicaría la existencia por primera vez de los estados del *barionio.* Estos estados se forman muy raramente (si es que lo hacen), debido a que las colisiones de corto alcance de la materia y de la antimateria conducen casi siempre a la aniquilación total. La confirmación de tales fenómenos abriría un interesante nuevo campo de estudio.

Siguiendo líneas similares, gracias a la máquina LEAR se podrían preparar otros sistemas atómicos que jamás han sido observados hasta la fecha. Con la energía adecuada, la colisión protón- antiprotón puede conducir a la producción de otros estados finales partícula-antipartícula. Puesto que estos objetos poseen cargas opuestas, su atracción eléctrica provocará la formación de un estado atómico si la reacción se produce con la energía umbral. Algunos de los sistemas completamente nuevos formados de esta manera pueden ser utilizados para comprobar las predicciones más detalladas de la electrodinámica cuántica. A medida que el sistema se relaja, las partículas se acercan cada vez más, hasta que la interacción fuerte domina y el sistema es aniquilado. Aquí también se presentan oportunidades de estudiar detalles de la reacción.

Para el estudio de los dibariones pueden resultar muy útiles los haces intensos de *kaones,* pues permiten la formación de sistemas con uno o más quarks extraños. Una de las predicciones más interesantes del modelo de bolsa de los hadrones es la existencia de un dibarión estable y doblemente extraño denominado *partícula H,* con una masa de 2,15 GeV. Incluso en el caso de que no sea estable, su masa relativamente pequeña indica que debería ser relativamente fácil de separar de otros fenómenos que podrían difuminar su identificación. No obstante, los experimentos todavía serían difíciles, pues se producen en dos fases: la producción de un hiperón de vida muy corta, *la cascada de partículas,* seguido de la interacción del hiperón con un nucleón en el blanco. Se han predicho muchos otros dibariones extraños; la observación de estos objetos proporcionaría una confirmación de la dinámica del modelo de quarks.

Finalmente, se pueden esperar grandes oportunidades de descubrimientos físicos procedentes de la naturaleza quark-gluon de la materia nuclear si se establece como base la experiencia obtenida con otros sistemas cuánticos de N-cuerpos. Así pues, pueden aparecer fenómenos no predichos incluso para aquellas interacciones mejor conocidas y más tratables (como la electrodinámica cuántica) que la fuerza fuerte. Si el descubrimiento experimental de la superconductividad no hubiera tenido lugar, por ejemplo, este fenómeno no se obtendría a partir de los conocimientos teóricos de la fuerza electromagnética en forma de QED.

MESONES Y RESONANCIAS BARIÓNICAS EN LOS NÚCLEOS

Los neutrones y los protones interactúan a través del intercambio de mesones virtuales. Por lo tanto, incluso al nivel más simple, los núcleos deben contener, además de los nucleones, los mesones que transportan la fuerza. Pero la búsqueda de evidencias directas de su presencia ha sido una caza infructuosa, pues para verlos se requieren haces de partículas de longitud de onda muy corta.

Una de las formas más antiguas y menos ambiguas de examinar los núcleos consiste en irradiarlos con haces de luz de longitud de onda extremadamente corta (radiación gamma); esta interacción puede ocasionar la fotodesintegración del núcleo. Cuando se aplicaron al deuterón cerca del límite de rotura, tales estudios proporcionaron los primeros resultados experimentales que requerían la presencia de mesones en el núcleo para ser explicados.

Tal como se mencionó en los capítulos 2 y 3, los estudios de haces de electrones de alta energía han producido resultados sobre los núcleos ligeros que únicamente pueden ser explicados si se introducen corrientes eléctricas y distribuciones de magnetismo debidas al intercambio de mesones. El trabajo sobre estos temas está progresando en diversos laboratorios, y el ansiosamente esperado acelerador de electrones de 4 G*e*V (CEBAF) extenderá enormemente los conocimientos sobre los mismos.

Como sería de esperar, buena parte de los conocimientos que se poseen sobre las propiedades nucleares procede de los experimentos que utilizan electrones, protones y piones para sondear las configuraciones más probables de los nucleones en los núcleos; éstas son las configuraciones que

predominan bajo condiciones ordinarias. Recientes avances teóricos y experimentales también permiten realizar (y comprender) experimentos diseñados para examinar configuraciones altamente improbables en las cuales, por ejemplo, dos núcleos están tan cerca que varios nucleones se agrupan formando una unidad; o un nucleón se mueve con una velocidad superior a la velocidad media de los demás. Muchos de tales experimentos, los cuales incluyen la difusión de electrones y protones, así como la producción de partículas exóticas a partir del núcleo, aprovechan procesos que no ocurrirían si los núcleos estuvieran compuestos únicamente de nucleones relativamente aislados.

Se espera que estos núcleos proporcionen nuevos datos acerca de la estructura de quarks del núcleo, la naturaleza de la interacción a distancias cortas, y la manera como el movimiento de varios nucleones podría correlacionarse en el medio nuclear. Si se utilizan reacciones selectivas para sondear e identificar correlaciones se avanzará en la comprensión de grado en el cual ciertos estados de la excitación nuclear pueden ser caracterizados como *moléculas nucleares o* como grupos de nucleones relativamente excitados, en lugar de un *gas de nucleones* en el que todas las partículas se mueven rápida e independientemente unas de otras.

Para comprender mejor cómo está construido el sistema de muchos cuerpos, los físicos han ideado métodos para implantar impurezas en el interior de los núcleos y estudiar los efectos de tales cambios en el sistema nuclear. La manera usual de implantar una impureza en un núcleo consiste en bombardear este último mediante un haz de piones o kaones. Cuando estas partículas interactúan con neutrones o protones, se forma una *resonancia bariónica* en el interior del núcleo. Ejemplos de tales especies bariónicas excitadas los constituyen la N* y la delta, las cuales son formadas a través de la interacción pion-nucleón, y la Y*, que se forma en la interacción kaón-nucleón. Aunque las vidas medias de estas especies en el interior de los núcleos es muy corta (incluso para los patrones nucleares), son lo bastante duraderas como para permitir modificaciones del medio nuclear y para que sean examinadas.

Bajo las condiciones adecuadas, el bombardeo de los núcleos con kaones negativos puede dar lugar a *hipernúcleos lambda,* en los cuales un hiperón de vida relativamente larga se forma en lugar de una resonancia bariónica en el interior de un núcleo. También en este caso, no es solamente el núcleo el que se modifica; las propiedades del propio hiperón (tales

como la vida media) pueden diferir sustancialmente de los valores que tienen como partícula libre. Las medidas de tales modificaciones ayudarán a comprender mejor la naturaleza detallada de las interacciones que tienen lugar en este campo. Los planes para el futuro incluyen el estudio de las propiedades de los núcleos exóticos formados mediante la implantación de otros tipos de partículas extrañas, así como la creación de objetos tan extraños como los *hipernúcleos dobles*, los cuales contienen embebidas dos impurezas hiperónicas.

PROPIEDADES DE LOS NÚCLEOS BAJO CONDICIONES EXTREMAS

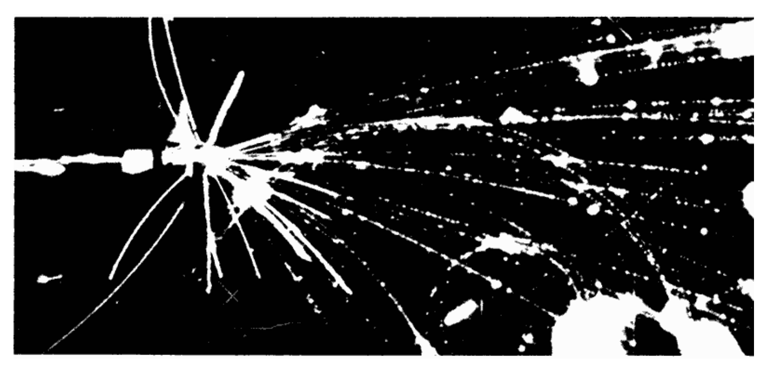
Las medidas de espectroscopia nuclear —utilizando reacciones de difusión elásticas e inelásticas, así como una gran variedad de reacciones de transferencia de partículas individuales y múltiples para estudiar las propiedades de los niveles energéticos nucleares y sus transiciones— han proporcionado la mayor parte de los conocimientos acerca del comportamiento de los sistemas nucleares. Mientras que algunos físicos nucleares tratan de comprender los papeles de los mesones y de los quarks en los núcleos, otros prosiguen el estudio de las propiedades de los niveles nucleares (funciones de ondas nucleares) bajo condiciones más y más extremas de parámetros como, por ejemplo, excitación, momento angular y cociente del número de protones y neutrones. El uso de aceleradores cada vez más potentes y de detectores cada vez más sofisticados continuará extendiendo el conocimiento de los sistemas nucleares de muchos cuerpos, de manera que se puedan modernizar los modelos actuales sometiéndolos a pruebas cada vez más extremas. Está claro que se está abriendo una interesante frontera en el estudio del papel de los constituyentes subnucleónicos en el núcleo (como se ha dicho anteriormente) y una prueba crítica que deberán pasar estas nuevas descripciones consistirá en su capacidad para describir con precisión las propiedades de los núcleos reales y de sus niveles energéticos.

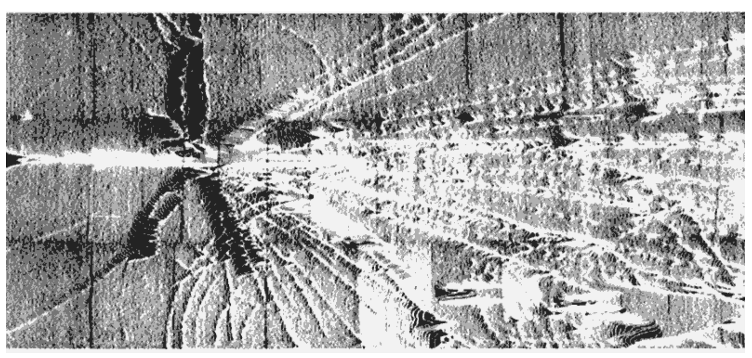
Algunas de estas condiciones pueden ser exploradas provocando colisiones entre núcleos con velocidades que sean mayores que la velocidad del sonido en la materia nuclear. Al igual que con el choque sónico de un aeroplano, pueden producirse fenómenos muy espectaculares cuando se

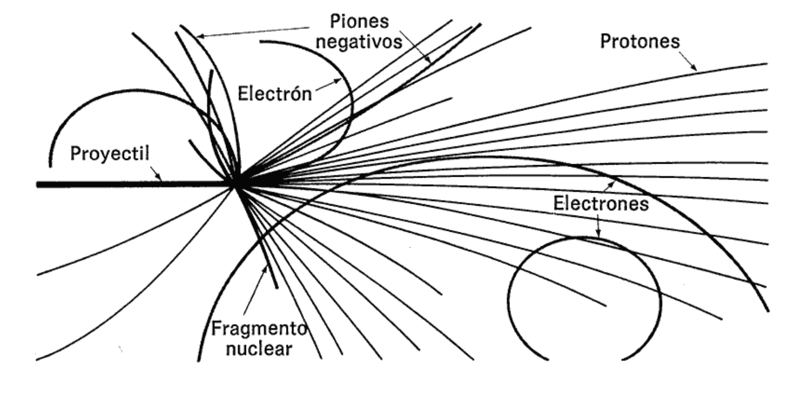
excede la barrera del sonido. Se debe tener en cuenta que en los núcleos, la velocidad del sonido es 500.000 veces superior a la del aire. Es, por lo tanto, gratificante que los aceleradores nucleares permitan efectuar estudios de colisiones entre núcleos pesados a velocidades tan elevadas, las cuales se corresponden con energías intermedias entre aquellas que se emplean en los estudios de espectroscopia nuclear y aquellas que se emplean en la transición a un plasma de quarks y gluones. Bajo tales condiciones, se espera que sea posible investigar fenómenos tales como ondas de choque nucleares, compresión de la materia nuclear y la desintegración completa de un núcleo en fragmentos más ligeros o incluso en los nucleones que lo constituyen. Se espera que las propiedades nucleares cambien drásticamente en esta región, desde el comportamiento cooperativo tipo fluido de muchos nucleones a bajas energías hasta una sucesión de muchas colisiones individuales nucleón-nucleón a altas energías.

Los problemas experimentales que plantea esta región de transición son desafiantes. Los nuevos aceleradores de la Universidad Estatal de Michigan, los del Laboratorio Nuclear de Chalk River en Canadá, y el GANIL en Caen, Francia, proporcionarán los haces necesarios. Deben diseñarse y construirse sofisticados instrumentos capaces de detectar y analizar la gran cantidad de partículas (del orden de 100) presentes en los restos de tales colisiones, y será necesario aprender a procesar e interpretar la avalancha de datos procedentes de tales experimentos para revelar los fenómenos físicos subyacentes (v. fig. 8-1). Los desafíos teóricos son igualmente enormes, pues se necesita desarrollar un marco conceptual y cuantitativo para describir una región en la que las hipótesis simplificativas presentes a muy altas o muy bajas energías ya no son válidas.

Entre los temas relacionados que deberán ser objeto de futuras investigaciones se encuentran las propiedades de los sistemas nucleares con momento angular muy elevado, y los valores en los cuales los núcleos se rompen debido a las fuerzas centrífugas. Otras condiciones extremas son los grandes excesos en el número de protones o de neutrones en un núcleo, los cuales proporcionan una marcada inestabilidad. Núcleos muy ricos en protones o en neutrones se producen típicamente en las reacciones entre dos elementos pesados en los cuales se transfieren muchos nucleones de un núcleo a otro. El estudio de tales núcleos en o cerca de los límites de estabilidad frente a la emisión de un protón o un neutrón pueden revelar interesantes modos de desintegración radiactiva.






Piones
negativos
Protones
Electrón
Proyectil
Electrones
Fragmento
nuclear

◄ **Fig. 8-1.** Las trazas dejadas por las partículas emitidas en una colisión nuclear de alta energía pueden ser registradas fotográficamente en un detector lleno de gas denominado cámara de burbujas (panel superior). Aquí un proyectil de argón-40 con una energía de 1,8 G*e*V por nucleón, colisionó con un núcleo blanco de plomo. Un CCD (en efecto, una cámara de TV controlada por computador) reconstruyó el fenómeno (panel central). El diagrama inferior identifica alguna de las partículas cargadas producidas durante la colisión. La longitud que se muestra corresponde aproximadamente a 1 metro. (Según W. C. McHarris y J. O. Rasmussen, Scientific American, enero 1984, pág. 58.)

Un cierto número de reacciones de importancia astrofísica, como, por ejemplo la captura rápida de neutrones en las explosiones de supernova y la captura rápida de protones en la superficie de las enanas blancas y de las estrellas de neutrones que acretan materia, dependen en su totalidad de las propiedades de los núcleos en los límites de estabilidad. Muchos de tales núcleos pueden ser creados con gran facilidad a través de la utilización de haces de proyectiles radiactivos de vida corta; éstos son producidos inicialmente en una reacción nuclear y, a continuación, son seleccionados y acelerados para producir una segunda reacción. Se están estudiando diversos enfoques para producir tales haces, los cuales prometen abrir áreas completamente nuevas en el campo de la espectroscopia nuclear.

9. La síntesis electrodébil y sus consecuencias

De vez en cuando, en la historia de la ciencia, aparece un principio unificador que junta dos cuerpos de conocimiento separados cuya conexión en un nivel más profundo no había sido descubierta previamente. La primera gran unificación en física fue probablemente la demostración de Newton de que la gravedad actúa sobre los objetos celestes de la misma forma que sobre los objetos de nuestro propio mundo. Posteriormente, en el siglo XIX, Maxwell unificó las fuerzas eléctrica y magnética al demostrar que eran manifestaciones de una única fuerza, la electromagnética. En el siglo XX, Einstein unificó los conceptos de espacio y tiempo —seguramente uno de los mayores logros individuales en física— y los de materia y energía, a través de la relatividad.

A finales de los años 30, se consideraba que las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza eran la gravitación, el electromagnetismo, la fuerza fuerte y la fuerza débil. En 1967, sin embargo, el trabajo de S. Weinberg, A. Salam y S. Glashow condujo a una síntesis de la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil en una única fuerza *electrodébil*. Este logro, uno de los triunfos de la ciencia moderna, ha producido importantes avances en el desarrollo de la física nuclear y de la física de las partículas durante el último decenio. En este capítulo se examinan algunas de las direcciones hacia las cuales parece conducir la fuerza electrodébil.

EL MODELO ESTÁNDAR

El valor de las grandes síntesis de unificación procede no sólo del modo simple en que tratan las acciones de la naturaleza, sino también del poder predictivo de sus consecuencias lógicas. La unificación de la electricidad y el magnetismo, efectuada por Maxwell, requirió la existencia de ondas electromagnéticas moviéndose a través del vacío con la velocidad de la luz, requisito que se cumple correctamente.

De manera similar, la síntesis electrodébil ya ha adquirido un crédito considerable gracias a la impresionante lista de predicciones cumplidas.

Una de ellas es que la fuerza débil debería estar mediada no sólo por el intercambio de partículas masivas cargadas los bosones W^+ y W^-, sino también por el intercambio de una partícula masiva neutra (el bosón Z^0). Todas ellas fueron descubiertas en el CERN en 1983. Además, la teoría electrodébil efectúa detalladas predicciones sobre los procesos nucleares. Por ejemplo, la desintegración mediante interacción débil de un kaón neutro en un muon positivo y un muon negativo es posible gracias al intercambio de una partícula neutra como el Z^0, pero este tipo de procesos sólo ocurre muy de vez en cuando. La teoría electrodébil explica correctamente este resultado sobre la base de sutiles efectos propios de los quarks extraños. Las consideraciones sobre este problema dieron lugar a un nuevo tipo de quark que recibía el nombre de *encantado* (denominado así porque logra que la teoría «funcione como por encanto»), que más adelante se demostró que existía. Debido a que las actuales teorías de la fuerza electrodébil y fuerte poseen tanto éxito, se las denomina el *Modelo Estándar.*

Cada hecho conocido de la física nuclear y de partículas es coherente con el Modelo Estándar. Esto no significa, sin embargo, que este modelo explique todos los procesos posibles. A pesar de sus espectaculares éxitos, los físicos están seguros de que el Modelo Estándar es incompleto. Por ejemplo, no incluye la fuerza gravitatoria; no explica por qué hay tres familias de leptones; y no tiene en cuenta la existencia de algunas importantes leyes de conservación o de sus violaciones. La violación de la paridad, por ejemplo, es una característica dominante de la fuerza electrodébil, aunque debe ser introducida dentro de la teoría de una manera arbitraria. De forma similar, se sabe que se produce la violación de la invariancia frente a la inversión temporal, pero no está claro cuál es la correcta de entre las diferentes maneras de incorporarla a la teoría. En el caso de las leyes de conservación de otras propiedades, como es el caso del número de familias leptónicas, no se sabe con certeza si es consecuencia de un principio subyacente de simetría o si la ley parece ser válida únicamente porque los actuales experimentos no son lo suficientemente sensibles como para detectar posibles violaciones.

No obstante, la fórmula matemática de la teoría electrodébil es la única teoría conocida de la interacción débil que es *renormalizable.* En una teoría renormalizable, de las cuales el arquetipo está constituido por la electrodinámica cuántica, las cantidades observables pueden ser calculadas hasta cualquier grado de precisión. La cromodinámica cuántica (QCD)

también es una teoría renormalizable, pero sus complicaciones matemáticas son tan grandes que sus cálculos, excepto cerca del límite de libertad asintótica, son muy difíciles.

FÍSICA CON HACES DE NEUTRINOS

La capacidad para obtener haces de protones muy intensos en las «fábricas» de mesones ha abierto la posibilidad de crear neutrinos a partir de los residuos nucleares creados cuando estos haces son frenados por la materia. Los neutrinos sólo interactúan a través de la interacción débil y pueden penetrar a través de vastas cantidades de materia sin ser frenados. Sin embargo, si se disponen copiosas cantidades de neutrinos y se utilizan detectores que pesan varias toneladas, pueden observarse unas cuantas interacciones con neutrinos. Tales experimentos permiten estudiar la parte débil de la fuerza electrodébil y comprobar la unidad fundamental de la interacción electrodébil mediante la fuerza electromagnética.

Un experimento que se encuentra actualmente en fase de realización en el Laboratorio Nacional de Los Alamos está diseñado para medir la dispersión de los neutrinos electrónicos por los electrones en un detector avanzado. De acuerdo con la teoría electro- débil, esta dispersión puede producirse de dos maneras: el neutrino y el electrón pueden intercambiar un bosón W^-, cambiando de esta manera sus identidades (el neutrino se convierte en un electrón y el electrón en un neutrino) o pueden intercambiar un bosón Z^0 y retener sus identidades originales. No es posible averiguar cuál de los dos procesos ha ocurrido en una colisión dada, de manera que la mecánica cuántica predice que estos procesos pueden interferir unos con otros, es decir, la probabilidad total de que este suceso ocurra no es simplemente la suma de las probabilidades individuales. Demostrar esta interferencia y medir su signo será la comprobación clave de la teoría electrodébil.

Con haces de neutrinos más intensos y energéticos, tales como los que podrían ser producidos por la siguiente generación de aceleradores en fase de construcción, pueden llevarse a cabo experimentos en los cuales los neutrinos son dispersados por los núcleos, dejándolos algunas veces en un estado excitado. Debido a que los estados nucleares poseen números cuánticos específicos, los experimentos de este tipo son capaces de diseccionar

la teoría electrodébil en sus partes, cada una correspondiente a estos números cuánticos. Tales comprobaciones no han sido efectuadas jamás y deberían proporcionar una evaluación mucho más profunda de la que se ha hecho actualmente acerca de la teoría electrodébil.

COMPROBACIÓN DE LAS TEORÍAS DE GRAN UNIFICACIÓN

Puesto que se dispone de dos potentes teorías de la materia nuclear (la teoría electrodébil y la QCD), se debería intentar unificar las fuerzas fuerte y electrodébil dentro de una *Teoría de Gran Unificación* que las incluya a ambas dentro de un formalismo matemático autoconsistente. En las unificaciones previas, la dificultad más importante residía en la construcción de una teoría viable que tuviera todas las propiedades requeridas. Ahora, sin embargo, ya existe un grupo de Teorías de Gran Unificación, las cuales son relativamente fáciles de construir. Cada una se remite de forma correcta a la QCD y a la teoría electrodébil a energías bajas (terrestres); no obstante, a energías cosmológicas, tales como las que deben haber existido poco después de la gran explosión, predicen una confusa variedad de fenómenos extraordinarios.

Estas diferencias entre las Teorías de Gran Unificación contendientes sólo se hacen evidentes a partir de energías que se estiman de unos 10^{15} G*e*V, las cuales, desgraciadamente, están más allá de cualquier acelerador terrestre concebible e incluso muy lejos de las energías de los rayos cósmicos. Por lo tanto, ¿cómo pueden obtenerse estas fantásticas energías de manera que pueda reconocerse cuál es la Teoría de Gran Unificación correcta? La respuesta puede encontrarse en el principio de incertidumbre de Heisenberg, el cual indica que una partícula emerge del vacío con una energía arbitraria en forma de partícula virtual, a condición de que desaparezca en el vacío al cabo de un cierto tiempo, es decir, en la medida que su vida media caiga dentro del límite prescrito. Cuanto más alta la energía, más corta es la vida media permitida. Por lo tanto, las partículas virtuales de energía ultraelevada podrían permitir el estudio de interacciones que de otro modo serían inaccesibles.

Una partícula virtual cuya masa fuera de 10^{15} G*e*V debería poseer algunas propiedades asombrosas, incluso para los patrones de la física de partículas. En términos de las unidades convencionales, su masa libre sería

de 10^{-9} gramos (equivalente a 10^{14} átomos de carbono, es decir, la masa típica de una bacteria), y existiría durante unos efímeros 10^{-39} segundos, lo bastante como para que se desplazara unos 10^{-16} diámetros del nucleón si viajara a la velocidad de la luz. Esta increíblemente breve existencia virtual de esta *partícula supermasiva de unificación* supone que cualquier efecto que pudiera tener lugar durante un experimento de laboratorio sería extremadamente débil. Los científicos experimentales deberán cribar los asombrosamente abundantes eventos nucleares para encontrar los escasos datos que revelen la signatura de una partícula de unificación. No obstante, se ha diseñado un cierto número de experimentos técnicamente posibles que se apoyan en la unificación de las fuerzas fuertes y electrodébiles. En las siguientes secciones se describen unos cuantos de estos experimentos, algunos de los cuales ya están en fase de realización, mientras que otros aguardan la construcción de nuevos aceleradores especializados.

Violación de la invariancia frente a la inversión temporal

Se desconoce el origen de la violación de la invariancia frente a la inversión temporal. En la actualidad, el único fenómeno en el que se presenta es en el de la desintegración de los mesones K neutros (kaones). Un kaón neutro y su antikaón son exactamente iguales excepto por el número cuántico denominado *extrañeza*, el cual está relacionado con la interacción fuerte. La interacción débil no respeta la extrañeza y «mezcla» los kaones puros y antikaones puros; los dos kaones que se observan realmente pueden ser imaginados (aproximadamente) como dos híbridos diferentes de los estados kaónicos puros.

Gracias a las Teorías de Gran Unificación provisionales, parece posible incorporar la violación de la invariancia frente a la inversión temporal dentro de su marco basándose en ciertos detalles de las propiedades de desintegración de estos kaones. Los experimentos para medir la desintegración de los kaones neutros con precisión y buscar evidencias de la violación de la invariancia frente a la inversión temporal en otros modos posibles de desintegración pueden ser cruciales para encontrar el camino correcto para explicar la violación en el contexto de la gran unificación. Sin embargo, para estos experimentos se necesitan haces de kaones de 10 a 100 veces más intensos que aquellos de que se dispone habitualmente.

El momento dipolar eléctrico del neutrón

Encontrar un segundo ejemplo de violación de la invariancia frente a la inversión temporal sería un gran acontecimiento en Física. Un ejemplo de estas características puede, concebiblemente, encontrarse en un neutrón —si se demostrara que posee un momento dipolar eléctrico. Una partícula eléctricamente neutra puede tener un momento dipolar eléctrico medible (separación interna de cargas positivas y negativas) únicamente si se viola la paridad y la invariancia frente a la inversión temporal.

Durante los últimos treinta años se han llevado a cabo experimentos muy sensibles para intentar medir el momento dipolar eléctrico del neutrón. Cuando un neutrón se encuentra entre los polos de un imán, la interacción con el magnetismo intrínseco del neutrón produce dos posibles niveles energéticos, dependiendo de si el eje del neutrón se alinea de forma paralela o antiparalela con el campo magnético aplicado. Puede inducirse un cambio observable de un nivel a otro si se baña a los neutrones con un campo de ondas de radio que tenga la frecuencia adecuada; un valor representativo es 60 megahercios (60 millones de ciclos por segundo) en un imán intenso. El principio es justamente el mismo que el empleado en los equipos de resonancia magnética-nuclear que emplean rutinariamente los químicos para detectar los protones en las moléculas. Sin embargo, un haz de protones no es adecuado para la búsqueda del momento dipolar eléctrico, debido a que los protones están cargados y serían desviados por el campo magnético. Los neutrones, por otro lado, no están cargados y pueden obtenerse en forma de un haz que se mueve lentamente, lo que produciría un aumento de la sensibilidad experimental debido al mayor intervalo de tiempo en el que permanece en el campo magnético.

En el experimento, se aplica un fuerte campo eléctrico y un fuerte campo magnético simultáneamente. Si el electrón posee un momento dipolar eléctrico, la energía añadida por la interacción eléctrica desplazará ligeramente la diferencia entre los niveles de energía del neutrón en el campo magnético. Los experimentos actuales son sensibles a desplazamientos tan pequeños como 0,001 hercios.

Si el neutrón posee un momento dipolar debe ser más pequeño que el que poseerían un electrón positivo y uno negativo separados por sólo 6×10^{-25} cm (aproximadamente 10^{-11} veces el radio del neutrón). Por lo tanto, si se expansionara un neutrón hasta alcanzar el radio de la Tierra, el

«abultamiento» que debería tener esta carga eléctrica en un hemisferio para dar lugar al valor máximo del momento dipolar debería ser del grosor de un cabello humano. Este límite infinitesimal ha eliminado un cierto número de teorías que predicen un momento elevado, respetando únicamente aquellas teorías que predicen o bien un momento muy pequeño o que no existe una violación observable de la invariancia frente a la inversión temporal aparte del sistema de los kaones.

Para incrementar más la sensibilidad de los experimentos, se necesitarán neutrones muy lentos (fríos), pues así permanecerán más tiempo en el campo magnético del detector, permitiendo medidas mucho más definidas. Los experimentos actuales han alcanzado los límites impuestos por los dos mayores reactores (en Francia y en la Unión Soviética) que producen neutrones fríos. Posteriores progresos necesitarán técnicas especializadas, tales como fuentes de neutrones por astillado y moderadores de temperatura en los aceleradores.

Desintegraciones poco habituales de muones y kaones

De acuerdo con el modelo de quarks, los seis sabores de los quarks se agrupan en tres familias distintas de dos sabores cada una. Se sabe desde hace tiempo que la interacción débil «mezcla» las familias de quarks, de manera que un quark de una familia puede convertirse en un quark de otra. El hiperón lambda (estructura de quarks *uds)* tiene por ejemplo un modo de desintegración poco habitual en el que se transforma en un protón *(uud),* un electrón y un antineutrino; este método de desintegración requiere evidentemente que un quark extraño de una familia se convierta en un quark arriba de otra.

Es interesante, aunque no necesariamente significativo, que los leptones también se agrupen en tres familias de dos cada una, y muchas teorías de gran unificación permiten la mezcla de familias leptónicas, en analogía con las mezclas de familias de quarks. Tales mezclas deberían permitir, a su vez, que ocurrieran modos de desintegración cuyo número de familia no se conservase, como, por ejemplo, la desintegración de un muon en un electrón y un rayo gamma (v. fig. 9-1). La observación de esta desintegración representaría a la vez una señal de que tal mezcla se produce a la vez

que indicaría cuál es el camino hacia la Teoría de Gran Unificación correcta.

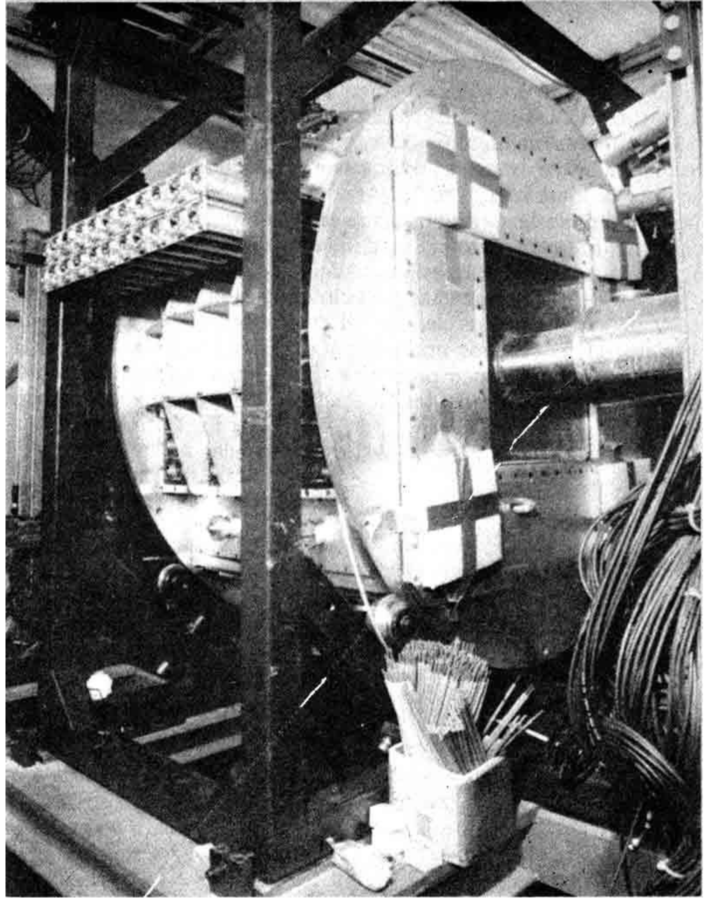


Fig. 9-1. El espectrómetro «La Caja de Cristal», un avanzado detector de partículas y radiación que se encuentra actualmente en construcción en la Instalación para la Física de Mesones de Los Alamos. Está formado por varios centenares de cristales de yoduro de sodio de forma especial, cada uno de ellos con su equipo electrónico, que será utilizado en la investigación sobre la desintegración de los muones en electrones y rayos gamma. (Cortesía del Laboratorio Nacional de Los Alamos.)

Se han realizado intensivos esfuerzos en las tres factorías de mesones que existen en el mundo —la «Los Alamos Mesón Physics Facility», la «Tri-University Mesón Facility» (Vancouver, Columbia Británica) y el Instituto Suizo de Investigación Nuclear (Villigen) — para encontrar el modo electrónico de desintegración del muon. El límite inferior hasta la fecha, establecido en Los Alamos, muestra que este fenómeno ocurre con una frecuencia que no supera uno de cada 6x 10^9 desintegraciones del muon. Se trata de un límite muy pequeño, pero una fuente de muones muy intensa debería permitir alcanzar límites aún menores (mayor sensibilidad experimental). La incapacidad para detectar un modo electrónico de desintegración de cada 10^{15} desintegraciones del muon podría eliminar casi todas las Teorías de Gran Unificación hoy concebidas.

Las desintegraciones poco comunes de los kaones ofrecen una gran cantidad de oportunidades para estudiar la síntesis electrodébil y sus consecuencias. Las actuales teorías predicen que un kaón positivo debería desintegrarse en un pión positivo y un par neutrino-antineutrino entre 1 y 30 veces por cada 10^{10} desintegraciones. El acuerdo entre el experimento y esta predicción confirmaría el número de familias de quarks, incluyendo la del hasta hoy no observado quark cima, e incluso proporcionaría su masa. Los experimentos para encontrar esta desintegración están pensados para los aceleradores actualmente existentes, por lo que se requerirán grandes detectores y largos tiempos de medida. Si la posibilidad de desintegración es significativamente menor que 1 de cada 10^{10}, entonces su detección está fuera del alcance de los medios actuales. Se necesitan aceleradores capaces de producir haces de kaones o muones mucho más intensos para poder estudiar las interacciones electrodébiles a través de sus modos de desintegración poco habituales.

Las teorías de las interacciones electrodébil y fuerte explican la mayor parte de los fenómenos conocidos en torno al núcleo atómico, que pueden tener su origen en niveles de conocimientos que solamente pueden surgir de la gran unificación de estas dos interacciones. Evidentemente, comprobaciones directas de la gran unificación son actualmente imposibles, ya que ningún acelerador concebible podría ni siquiera aproximarse a la energía de 10^{15} G*e*V que se necesita para ello.

Por lo tanto, los estudios actuales se centran en procesos extremadamente raros, pero profundamente significativos, que pueden observarse a

energías accesibles. Además de la elevada selectividad y sensibilidad experimentales, esta investigación requiere haces tan intensos como sea posible, con el objeto de producir un enorme número de fenómenos entre los que poder encontrar ocasionalmente los que son poco probables. Estos inapreciables fragmentos de información procedentes de la física nuclear pueden resultar esenciales, en último término, para ensamblar los fragmentarios conocimientos de las interacciones fundamentales en una Teoría de Gran Unificación.

10. Prioridades que se recomiendan para la física nuclear

La financiación federal de la investigación básica en física nuclear en Estados Unidos empezó a finales de los años 40, primero bajo los auspicios de la Oficina de Investigación Naval (Office of Naval Research) y la Comisión de Energía Nuclear (Atomic Energy Commission). Actualmente continúa bajo el patrocinio del Departamento de Energía (Department of Energy: DOE) y la Fundación Nacional para la Ciencia (National Science Foundation: NSF). Sin el apoyo de estas dos organizaciones, esta vital disciplina no habría proporcionado las abundantes y significativas contribuciones en investigación básica y aplicada que han contribuido a colocar a Estados Unidos en la posición de líder mundial de la ciencia y la tecnología. Sin embargo, el Comité de Física Nuclear (Panel on Nuclear Physics) prevé que el liderazgo de los americanos en esta disciplina se está erosionando, debido en parte a la agresiva búsqueda de importantes programas de investigación en Europa y en Japón. Por lo tanto, Estados Unidos debería tomar acciones decisivas si quiere mantener una posición de vanguardia en la investigación internacional sobre física nuclear.

En octubre de 1977, se estableció la Comisión Asesora de Física Nuclear (Nuclear Science Advisory Committee: NSAC) del DOE/NSF como respuesta a la necesidad de que un comité de expertos examinara las actividades generales y las tendencias en varios subcampos de la física nuclear y efectuara las recomendaciones necesarias a las agencias de financiación. En 1979, el NSAC emitió su primer Plan de Largo Alcance para la Ciencia Nuclear; su segundo Plan se completó en 1983. El propósito de estos estudios consiste en revisar los programas previos y futuros, evaluar las necesidades actuales y anticipar las futuras; también trata de asegurar que las instalaciones existentes sean mantenidas y modernizadas adecuadamente y que se desarrollen las nuevas de manera que se puedan obtener avances importantes. El Comité se reunió independiente y conjuntamente con el NSAC durante el Taller, de una semana de duración, celebrado en julio de

1983, cuando se formularon las líneas maestras del Plan de 1983. Las recomendaciones que se detallan a continuación son el resultado de estas extensas discusiones e interacciones.

ACELERADORES EN FÍSICA NUCLEAR

Puesto que los aceleradores son las herramientas básicas de la física nuclear, es necesario revisar brevemente su estatus. Las sondas que se necesitan para examinar el núcleo atómico son haces de núcleos y de partículas subnucleares, acelerados hasta energías suficientemente altas como para poder penetrar en los núcleos blanco o ser dispersados por ellos. Los proyectiles deben llegar en forma de un haz enfocado sobre la región del blanco, el cual se encuentra situado, a menudo, lejos del punto en el que emerge el haz procedente del acelerador. Para registrar y medir las partículas producidas por las interacciones nucleares se utilizan uno o más detectores. La planificación, diseño y construcción de aceleradores de alta calidad y las instalaciones experimentales adicionales son cada vez más importantes para la comunidad de físicos nucleares. Los diseños deben optimizarse para acomodar aquellos programas capaces de producir, con mayor probabilidad, nuevos resultados en áreas críticas de la investigación, así como para satisfacer las necesidades del mayor número posible de usuarios.

La capacidad de un acelerador para proporcionar un tipo dado de partículas con una energía específica puede describirse con tres parámetros: la *intensidad* del haz, o número de partículas incidentes sobre el blanco por segundo; la *resolución energética*, o la anchura de la dispersión de energías del haz, expresada normalmente como un porcentaje de la energía total, y el *factor de actividad, o* fracción de tiempo durante la cual las partículas chocan contra el blanco. Algunos haces, por ejemplo, son pulsantes, es decir, el factor de actividad es entonces el cociente entre la duración del pulso y el período de repetición. La optimización de estos tres parámetros es deseable pero raramente posible, por lo que el diseño de un experimento particular requiere decidir cuál de ellos puede o debe optimizarse. Un haz de baja intensidad o un bajo factor de actividad puede incrementar enormemente el tiempo necesario para acumular el número de eventos (in-

teracciones nucleares) necesarios para efectuar medidas estadísticas significativas. Resoluciones energéticas bajas reducen la precisión que puede alcanzarse en las medidas. No obstante, a menudo se puede optimizar la intensidad de un haz a expensas de su resolución energética o viceversa.

Los aceleradores cubren un abanico de tamaños que va desde las grandes instalaciones multiusuario diseñadas para cubrir las necesidades de los físicos residentes y las de los usuarios de otras instituciones (locales o extranjeras). Aunque los más pequeños aceleradores universitarios suelen ser accesibles a usuarios externos, están adaptados en gran medida a las necesidades de sus propias facultades. Todas estas instalaciones permiten efectuar investigaciones de vanguardia en física nuclear y proporcionar, a la vez, la educación y el adiestramiento de los estudiantes y becarios postdoctorales.

Instalaciones disponibles

Los aceleradores actualmente en uso proporcionan un amplio espectro de proyectiles, energías e intensidades del haz para una gran variedad de programas de investigación. El tipo de proyectil y su energía determinan la naturaleza de la información que el experimento proporcionará. Algunos experimentos requieren electrones, con sus interacciones particularmente bien conocidas; otros necesitan intensos haces de protones o mesones producidos secundariamente, mientras que otros, por su parte, requieren iones pesados de alta energía. La capacidad para adecuar las técnicas experimentales a la variedad de problemas que plantean la estructura y las reacciones nucleares ha constituido un elemento crucial en los grandes avances de la física nuclear durante la última década. Existen nueve grandes instalaciones nacionales multiusuario que cubren este espectro; las dos mayores son la Instalación para la Física de Mesones de Los Alamos (Los Alamos Mesón Physics Facility: LAMPF), un acelerador lineal de protones en el Laboratorio Nacional de los Alamos, y el Complejo Bevalac, un acelerador de iones pesados relativistas situado en el Laboratorio Lawrence de Berkeley (Lawrence Berkeley Laboratory). Además, existen 13 aceleradores universitarios dedicados principalmente a la investigación en física nuclear que proporcionan sondas especializadas para programas de investigación bastante diversificados. Estos 22 aceleradores (muchos de

los cuales han sido modernizados sustancialmente durante los últimos años) así como sus capacidades y ejemplos de los problemas de investigación para los que se utilizan se hallan resumidos en el Apéndice A.

Con los continuos avances en física y tecnología, es inevitable que los aceleradores acaben resultando obsoletos como instalaciones primarias de investigación. Desde 1976, se ha limitado la financiación del DOE o del NSF para física nuclear básica a 17 aceleradores. Aunque este hecho suele estar acompañado de una disrupción sustancial en el adiestramiento pre y postdoctoral, se necesita una juiciosa redistribución de recursos para que la disciplina pueda evolucionar, con objeto de que puedan construirse nuevas máquinas más avanzadas y más eficientes. Los 22 aceleradores descritos en el Apéndice A constituyen, para el futuro próximo, una fuerza equilibrada, vital y altamente productiva para el desarrollo de la física nuclear moderna. El imperativo de empujar las fronteras aún más lejos necesita, sin embargo, la toma de nuevas iniciativas importantes. Algunas de éstas se describen en las siguientes secciones.

El acelerador continuo de haces de electrones

Los aceleradores diseñados y construidos durante los años 60 para la investigación en física nuclear contribuyeron en gran medida a la comprensión sobre la distribución de cargas eléctricas en los núcleos, las excitaciones colectivas coherentes del núcleo y la electrodesintegración coherente de éste. Estos aceleradores, sin embargo, poseen energías relativamente bajas, pobres resoluciones energéticas y un pequeño factor de actividad. Durante la última década, una nueva generación de aceleradores ha producido electrones con energías por encima de los 750 M*e*V con una resolución energética excelente y con factores de actividad del 1 al 2%, un orden de magnitud por encima de las primeras máquinas. Los experimentos con estas instalaciones han tenido un impacto enorme sobre el conocimiento y comprensión de la espectroscopia nuclear, la producción de mesones y las corrientes de intercambio de mesones. Durante la misma época, los experimentos efectuados con los núcleos más ligeros a energías muy altas, pero con una máquina de bajo factor de actividad en el Acelerador Lineal de Stanford sugirieron la necesidad de una visión más amplia del núcleo, que abarcara la estructura de quarks de los nucleones.

A partir de estos experimentos con electrones han surgido conexiones significativas entre la física nuclear y la física de partículas elementales, y parece que se produce una transición suave en el comportamiento de los núcleos al aumentar la energía. Este comportamiento está bien descrito a bajas energías por los modelos de núcleo formados por partículas independientes, los cuales sólo tienen en cuenta a los nucleones. Por otro lado, a energías más altas, deben tenerse en cuenta los efectos de los bariones y de los mesones y, finalmente, de los quarks y de los gluones. Las medidas de coincidencia, en las cuales sólo se obtienen resultados significativos a partir de un número muy reducido de eventos, son de una gran importancia para estos estudios y requieren aceleradores con factores de actividad mucho mayores que los actuales. Se necesitan energías e intensidades mayores para extender la investigación hasta la escala de las distancias muy cortas, donde el núcleo puede describirse mejor en términos de sus constituyentes fundamentales, los quarks y los gluones. Esta frontera de la investigación podría ser alcanzada mediante un acelerador capaz de producir electrones de 4 G*e*V, una energía que es suficiente para estudiar la formación de resonancias bariónicas (estados excitados de los nucleones), mesones pesados y partículas «extrañas» en el ambiente nuclear.

Basándose en el *Estudio Conjunto sobre el Papel de los Aceleradores de Electrones en la Ciencia Nuclear de Medianas Energías de los Estados Unidos* (el informe Livingston, de 1977) el NSAC, en su Plan de Largo Alcance, estimó que era necesario un acelerador de electrones con un elevado factor de actividad para haces de energía variable que pudieran llegar a energías de varios G*e*V. Subsiguientemente, en el informe del año 1983 emitido por el Comité sobre el Acelerador de Electrones del NSAC se recomendó la construcción de un complejo, propuesto por las Asociación de Investigación de las universidades del Sureste, formado por un acelerador lineal de 4 G*e*V y un anillo de almacenamiento, con un factor de actividad del 100%, denominado actualmente Acelerador Continuo de Haces de Electrones (Continuous Electron Beam Accelerator Facility: CEBAF). La financiación para la investigación y desarrollo de esta máquina empezó en 1984, y la de su construcción en el 1987. El coste total del acelerador se estima en 225 millones de dólares (en dólares actuales); esto incluye 40 millones de dólares para el equipo experimental inicial.

Esta sección concluye con una cita extraída del Plan de Largo Alcance de 1983 del NSAC *(A Long Range Plan for Nuclear Science: A Report by*

the DOE/NSF Nuclear Science Advisory Committee, diciembre de 1983, página 75):

Está claro que las sondas electromagnéticas jugarán un papel cada vez más importante en muchas áreas de la física nuclear. Las cuestiones sobre la interacción nucleón-nucleón, sobre las conexiones entre la QCD y la estructura en quarks, sobre la estructura hadrónica de los núcleos, las excitaciones elementales y las simetrías de la estructura nuclear requerirán, todas ellas, sondas electromagnéticas. *El nuevo acelerador de electrones de 4 GeV en elNEAL* (National Electron Accelerator Laboratory, el nombre original del CEBAF) *es claramente el proyecto más importante, a corto plazo, en física nuclear.*

Se debe tener en cuenta que el Comité sobre Física Nuclear respalda la construcción del CEBAF.

EL SEGUNDO PROYECTO EN IMPORTANCIA: EL COLISIONADOR NUCLEAR RELATIVISTA

Tal como se explicaba en el capítulo 7, el aumento de nuestros conocimientos sobre la interacción fuerte entre hadrones nos ha conducido a pensar que, bajo condiciones de elevada temperatura y densidad de la materia nuclear, se efectuaría una transición desde la materia hadrónica excitada hasta un *plasma de quarks y gluones,* en el cual los quarks, antiquarks y gluones ya no estarían confinados en el interior de los hadrones individuales sino que estarían libres para moverse (durante unos 10^{-22} segundos) en el interior de un volumen mucho mayor. Se cree que este estado extremo de la materia tuvo lugar en la naturaleza justo al inicio del Universo, en los primeros microsegundos después de la gran explosión, y todavía puede existir en los núcleos de las estrellas de neutrones, pero nunca ha sido observado desde la Tierra. Su producción y análisis en experimentos de laboratorio controlados podrían proporcionar información científica que atravesaría las fronteras tradicionales de la física nuclear, de la física de partículas elementales y de la astrofísica y crearía un fondo de conocimientos importante para algunas cuestiones de cosmología.

Las estimaciones teóricas actuales sugieren que las colisiones de proyectiles nucleares pesados con energías del orden de 30 GeV por nucleón pueden generar temperaturas y densidades lo suficientemente altas como para que los quarks y los gluones que constituyen los nucleones creen

grandes cantidades de quarks, antiquarks y gluones a partir de la energía de la colisión. A estas energías relativistas, las colisiones frontales de dos núcleos pesados crearán una región extremadamente densa y caliente de materia nuclear que abarcará varios centenares de fermis cúbicos de volumen. La enorme densidad de energía alcanzada en este gran volumen representará una combinación única de condiciones —no alcanzable en las colisiones de electrones, protones o núcleos ligeros— para crear el plasma de quarks y gluones. El acelerador necesario para producir estas colisiones, un *colisionador nuclear relativista* (RNC), sería el acelerador de mayor energía del mundo capaz de proporcionar haces de núcleos que abarquen cualquier núcleo de la tabla periódica, desde el hidrógeno al uranio.

Aunque la producción del plasma de quarks y gluones —en las regiones de alta densidad de energía (la región *central)* y elevada densidad bariónica (las regiones de *fragmentación)* — representarían el foco de investigación más importante del RNC, este acelerador proporcionaría muchas oportunidades adicionales en física nuclear, incluyendo las siguientes:

• Extensión del estudio de la cromodinámica cuántica (QCD) hasta grandes distancias (aproximadamente el diámetro del núcleo), complementando su estudio a distancias muy cortas (menos que el diámetro de un nucleón), en los cuales se utilizan como sondas electrones y hadrones.

• Posibilidad de estudiar las condiciones bajo las cuales las masas de los quarks ligeros tienden a cero (como se predice en la QCD) y los estados del sistema de quarks obedecen una simetría mano derecha/mano izquierda (*simetría quiral).*

• La primera oportunidad para estudiar la dinámica de los objetos extensos con densidades de energía muy elevadas —condiciones que sólo pueden alcanzarse en las colisiones nucleares relativistas.

• La posible producción de objetos exóticos, tales como quarks libres (con carga eléctrica fraccionaria), agrupaciones de quarks con propiedades topológicas (estructurales) únicas o con extrañeza extraordinariamente alta, y Centauros —eventos misteriosos, observados en estudios de rayos cósmicos de energía muy elevada, que no producen o producen muy pocos piones neutros, lo cual supone una interacción nuclear de tipo desconocido hasta ahora.

Además de producir haces colisionantes para un programa de estudio dedicado al plasma de quarks y gluones, el RNC también debería ser capaz

de efectuar una gran variedad de experimentos de blanco fijo a energías del orden de 30 G*e*V por nucleón. Algunos ejemplos que muestran la extensión de este programa de investigación con blancos fijos serían los siguientes:

• Producción y estudio de núcleos radiactivos lejos del valle de estabilidad y su uso como haces exóticos secundarios.

• Desarrollo de un extenso programa de física nuclear con sistemas muy pesados a energías relativistas, utilizando haces intensos para estudiar los procesos poco habituales, tales como la producción coherente de piones (a partir de un condensado de piones, por ejemplo).

• Investigación de materia hadrónica altamente condensada (en la cual están confinados los quarks y los gluones), proporcionando nuevas oportunidades para deducir la ecuación de estado de la materia nuclear bajo condiciones alejadas de lo normal.

• Creación de la máxima densidad posible de bariones que se pueda alcanzar en un experimento de laboratorio, abriendo así una nueva vía de investigación experimental en astrofísica nuclear.

• Estudios sobre iones pesados con muy pocos electrones para abrir nuevos campos en los que poner a prueba la electrodinámica cuántica.

Recomendaciones del plan 1983 de largo alcance del NSAC

Debido a que los planes de largo alcance para física nuclear fueron revisados en 1983 por el NSAC, es importante señalar la importante recomendación de esta Comisión para la construcción de una nueva instalación, tomada del sumario (pág. VI) de su Plan de 1983:

Nuestra creciente comprensión de la estructura fundamental de los núcleos y de la interacción entre hadrones ha dado lugar a una oportunidad científica de gran importancia: la posibilidad de encontrar y explorar una fase enteramente nueva de la materia nuclear. En la interacción de haces muy energéticos de núcleos atómicos pesados se producirán condiciones extremas de densidad de energía, condiciones que hasta la fecha sólo habían prevalecido en los primeros momentos de la creación del Universo. Esperamos obtener bajo estas condiciones muchos fenómenos cualitativamente nuevos; por ejemplo, puede tener lugar una espectacular transición hacia una nueva fase de la materia, el plasma de quarks y gluones. La observación y el estudio de esta nueva forma de materia que interactúa fuertemente debería tener claramente un impacto importante, no solamente en física nuclear sino también en astrofísica, en física de altas energías y

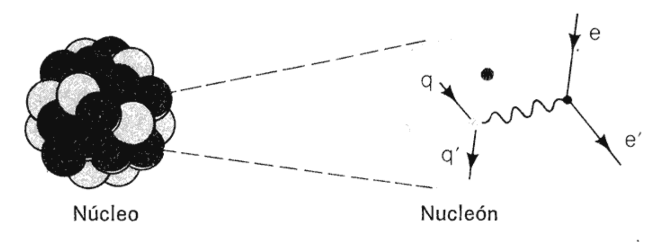
sobre la amplia comunidad científica. La instalación necesaria para alcanzar esta revolución científica es técnicamente factible en la actualidad y se encuentra dentro de nuestro alcance; se trata de un acelerador que pueda provocar la colisión de haces de núcleos muy pesados con energías de unos 30 G*e*V por nucleón... *La opinión de esta Comisión es que Estados Unidos debería proceder a la planificación de la construcción de este colisionador de haces de iones pesados relativistas inmediatamente, y esto lo vemos como la nueva oportunidad científica de mayor prioridad dentro de las previsiones de nuestra ciencia.*

El Comité respalda el Plan de 1983 de Largo Alcance del NSAC en la recomendación de la elaboración de los planes para la construcción de un acelerador capaz de provocar la colisión de haces de núcleos muy pesados a energías del orden de 30 G*e*V por nucleón con los cuales crear las condiciones extremas de la materia nuclear descritas anteriormente. El coste de esta instalación, incluyendo los detectores iniciales más importantes, sería de 250 millones de dólares (en dólares de 1983), con un período de construcción de 4 o 5 años. Los costos de mantenimiento e investigación serían de unos 35 millones de dólares por año. Se necesitaría un cierto grado de investigación y desarrollo para refinar el diseño de este acelerador y especificar su costo. Una vez diseñado, su construcción debería empezar tan pronto como fuera posible, de acuerdo con la del acelerador de electrones de 4 G*e*V. Puesto que los niveles de financiación son difícilmente adecuados para responder, con las instalaciones *actuales,* a las interesantes oportunidades científicas que se abren en este campo, sería recomendable un incremento de los fondos operacionales en física nuclear que fueran suficientes para llevar a cabo el necesario programa de investigación y desarrollo de los aceleradores así como los programas de investigación y operación que estas dos nuevas instalaciones procurarán.

Aspectos complementarios del CEBAF y del RNC

Los dos nuevos aceleradores que se están planeando para la comunidad de físicos nucleares de Estados Unidos —el Acelerador Continuo de Electrones (CEBAF) y el colisionador nuclear relativista (RNC)— se dedicarán al estudio de problemas extremadamente importantes relacionados con la estructura de quarks. No obstante, los programas de investigación teóricos y experimentales de ambos aceleradores serán muy diferentes. (V. fig. 10-1.).

(a) Equipo acelerador continuo de haces de electrones (CEBAF)



(b) Colisionador nuclear relativista (RNC)

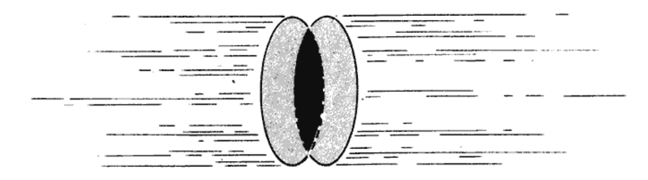


Fig. 10-1. Aspectos complementarios del CEBAF y el RNC. (a) El CEBAF estudiará la respuesta de los núcleos a las perturbaciones de tipo puntual y alta energía causadas por la interacción de los electrones con los quarks, para distancias mucho menores que 1 fermi. (b) El RNC comprobará la respuesta de los núcleos pesados a las altas densidades de energía creadas dentro de grandes volúmenes (centenares de fermis cúbicos) cuando éstos colisionan frontalmente a velocidades relativistas.

Mediante la utilización de intensos haces de electrones de alta energía, el CEBAF sondeará el comportamiento a cortas distancias de los quarks en los núcleos con la precisión de un cirujano. Esto lo realizará mediante la implantación localizada de perturbaciones electromagnéticas en el núcleo y midiendo la respuesta del medio nuclear a este estímulo. Los electrones, al ser partículas puntuales, resultan adecuados para tales estudios. Actuarán como un potente microscopio que mostrará cómo la estructura de quarks afecta las propiedades e interacciones de los nucleones que residen en el interior de los núcleos blanco.

El RNC, por otro lado, logrará que haces de núcleos pesados colisionen violentamente entre sí. Estos núcleos son objetos relativamente grandes, cuyos volúmenes son del orden de varios centenares de fermis cúbicos. Cuando colisionan frontalmente, toda la materia nuclear puede interactuar y ser calentada hasta temperaturas y densidades de energía tan enormes,

que los quarks y los gluones pueden quedar desconfinados de los nucleones, y puede crearse un gran número de quarks, antiquarks y gluones. Por lo tanto, estas partículas pueden moverse en el interior de un volumen relativamente grande: el plasma de quarks y gluones. Se espera que el comportamiento macroscópico de los quarks se revele bajo estas condiciones.

Por lo tanto, se necesitarán ambos tipos de aceleradores para ver cómo los quarks modifican y extienden el campo de la física nuclear, es decir, para elucidar los aspectos macroscópicos y microscópicos de los quarks en la materia nuclear.

RECOMENDACIONES ADICIONALES

En el momento de evaluar las expectativas de la física nuclear en un futuro próximo, es vital tener en cuenta las instalaciones y medios distintos de la construcción de los dos grandes aceleradores discutidos anteriormente. El análisis del estado actual de la física nuclear implica las siguientes recomendaciones sobre otros aspectos importantes del campo.

Instalaciones para objetivos adicionales

La comunidad de físicos nucleares se ha planteado un cierto número de problemas adicionales, que aparecen listados en la tabla 10-1. Aquí vuelve a ser apropiado citar el sumario (pág. V) del Plan de Largo Alcance de la NSAC del año 1983:

Las cuestiones más importantes con que se enfrenta la física nuclear apuntan hacia un cierto número de grandes objetivos científicos que se encuentran más allá del alcance de las instalaciones que existen o que están bajo construcción. Muchos de estos objetivos son alcanzables mediante una modernización y una ampliación de la capacidad de los medios ya existentes. Entre ellos se encuentran: capacitación para operar de forma continua con alta resolución (CW) mediante electrones por debajo de 1 G*e*V, mejora sustancial de los haces de kaones, mejora de la capacidad para trabajar con haces de neutrinos de energía intermedia, haces de antiprotones, mejora de los haces de protones de energía variable entre 200 y 800 M*e*V, y también por encima de los 800 M*e*V, intensas fuentes de neutrones con energías por encima de unos cuantos centenares de M*e*V, capacidad para acelerar iones muy pesados con facilidades para variar su energía entre 3 y 20 M*e*V por nucleón, instalación para producir pulsos de muones de gran intensidad, y un cierto número de otras opciones. Estimamos que una fracción razonable de estos

objetivos pueden realizarse dentro del programa base general. Las decisiones sobre las prioridades relativas deberían hacerse posteriormente y con propuestas más específicas en la mano.

Debe mencionarse que unas cuantas de las posibilidades de la tabla 10-1 (específicamente, la segunda, quinta, sexta y octava), que hacen referencia a los temas mencionados anteriormente, podrían quedar englobadas bajo otro gran acelerador multiusuario. Tal como se ve actualmente, un acelerador de estas características debería comprender un sincrotrón capaz de producir haces muy intensos de protones con energías de unas cuantas decenas de G*e*V, seguido por un anillo de almacenamiento para producir una fuente casi continua de protones que podría proporcionar haces secundarios de piones, kaones, muones, neutrinos y antinucleones. Las intensidades de estos haces deberían ser de unas 50 a 100 veces más grandes que las disponibles en cualquier otro lugar, permitiendo una sustancial mejora de la precisión y sensibilidad de una amplia clase de experimentos en la interfase entre la física nuclear y la física de partículas. En este contexto, es necesario citar una vez más el Plan de Largo Alcance del NSAC correspondiente al año 1983 (págs. 74-75):

Una nueva gran «factoría de kaones», un acelerador de protones de 10 a 30 G*e*V con una producción de 10^{14}-10^{15} protones por segundo, proporcionaría sustanciales oportunidades para la física en todas estas áreas. Evidentemente, esta física es muy importante, fundamental e interesante. Dado nuestro compromiso para la construcción de un Acelerador Nacional de Electrones (ahora denominado Acelerador Continuo de Haces de Electrones) y la del colisionador de iones pesados citado anteriormente, las limitaciones financieras de este informe impiden la construcción de una nueva gran instalación. Sin embargo, puesto que las circunstancias cambian, queremos mantener abierta esta importante opción, la cual ofrece grandes oportunidades.

Tabla 10-1. Instalaciones para Objetivos Adicionales de Física[3] Nuclear

Programa de investigación (ejemplos)	***Capacidad requerida***
Estructura de las excitaciones nucleares elementales; forma de las distribuciones de momento angular; naturaleza de las interacciones nucleares de alcance medio y largo	Haces de electrones con un elevado factor de actividad y buena resolución energética a energías por debajo de 1 G*e*V
Dependencia del spin de la interacción nuclear; comprobaciones de las simetrías fundamentales; estructura nuclear para altas transferencias de momento	Haces de protones de alta calidad, de alta intensidad y polarizados con energías comprendidas entre 50 M*e*V y varios G*e*V
Modelo óptico microscópico; estructura nuclear y transiciones de forma; estudios de las resonancias de Gamow-Teller	Haces de neutrones secundarios (polarizados y sin polarizar) con intensidad elevada y buena resolución energética a energías de varios centenares de M*e*V
Espectroscopia nuclear de isótopos que se encuentran lejos de la estabilidad; ritmos de reacciones nucleares de interés astrofísico; búsqueda de núcleos exóticos y de elementos superpesados	Intensos haces secundarios de núcleos radiactivos
Física hipernuclear; desintegraciones de kaones y otros estudios sobre la interacción débil; átomos exóticos	Intensos haces de kaones de gran pureza
Comprobaciones de las interacciones electrodébiles; interacciones de los leptones con los núcleos; estudios de sólidos mediante resonancias muónicas	Intensos haces de muones y neutrinos de alta calidad

[3] Esta secuencia no intenta sugerir prioridades relativas.

Dependencia de los mecanismos de las reacciones nucleares con la energía; desintegración multipartícula de núcleos compuestos altamente excitados; resonancias gigantes	Iones pesados hasta llegar al uranio, con energías entre 10 y 100 M*e*V por nucleón
Física nuclear con antinucleones; interacciones antinucleón-nucleón para estudiar la dinámica de quarks; sistemas atómicos con antinucleones	Haces de antinucleones de energía media y baja
Astrofísica nuclear; medidas de los neutrinos solares; oscilaciones de los neutrinos	Detector de neutrinos sensible a neutrinos de baja energía (menos de 300 k*e*V)

Instrumentación nuclear

Existe un serio problema nacional en lo que concierne al adecuado apoyo continuo de la instrumentación nuclear. El Plan de Largo Alcance de 1983 del NSAC muestra que la cantidad gastada por Estados Unidos en la investigación básica sobre física nuclear respecto al Producto Nacional Bruto es menor que la mitad de lo que gasta Europa Occidental o Canadá. Los efectos de esta discrepancia pueden observarse fácilmente en la calidad y sofisticación de la instrumentación europea, la cual sobrepasa de lejos en muchos casos a la que se encuentra en muchas universidades estadounidenses y laboratorios nacionales. Por lo tanto, se considera esencial un aumento de los fondos dedicados a la instrumentación.

Los ejemplos de la necesidad de nuevos equipos son numerosos. Para obtener información sobre la desexcitación de los estados de spin elevado que se forman en las colisiones de iones pesados se requiere la utilización de grandes conjuntos de detectores de centelleo dispuestos en forma esférica denominados *bolas de cristal.* El estudio de colisiones de iones pesados relativistas requiere el uso de detectores de gran masa y grano fino que permitan la localización simultánea, seguimiento, identificación y detección de la energía de un gran número de partículas. Las prestaciones de los sistemas espectrométricos magnéticos han mejorado continuamente, y me-

diante la utilización de imanes superconductores pueden obtenerse grandes mejoras (así como una reducción considerable del coste). Los estudios de los efectos producidos por la alineación de los spins de las partículas requieren blancos y fuentes de iones que estén polarizados para producir haces polarizados de alta intensidad. La necesidad de avances en las técnicas de reducción de datos son igualmente urgentes, pues el número de parámetros medidos crece con la complejidad de los experimentos.

También se necesitan programas de investigación y desarrollo para determinar las soluciones más efectivas a las demandas rápidamente crecientes de instrumentación sofisticada. Por ejemplo, los haces de gran energía requerirán el desarrollo de sistemas detectores cuyas capacidades exceden con mucho a las que han sido utilizadas hasta la fecha en física nuclear. Se necesitará un programa extensivo de investigación y desarrollo para la implementación de detectores en el CEBAF, así como un programa para desarrollar detectores con un gran ángulo sólido, elevada segmentación y buena capacidad de identificación de partículas para el RNC.

Teoría nuclear

En la física nuclear, así como en otras ramas de la física, el trabajo teórico proporciona numerosos datos interpretativos. Aunque en todos los campos científicos existen siempre algunos experimentos que producen significativos, y a veces espectaculares, progresos por sí solos, el avance regular proviene en su mayor parte de la selección informada de los experimentos. Los teóricos que trabajan estrechamente con los científicos experimentales pueden indicar la dirección más adecuada para la selección del experimento sugiriendo cuál sería la forma más crítica de comprobar una idea y cuáles las medidas o condiciones que permitirían un completo análisis teórico. Cuanto más estrecha es la colaboración entre teoría y experimento, más efectivos son ambos a la hora de sintetizar un cuerpo de conocimientos coherente.

Aunque el Plan de Largo Alcance del NSAC de 1979 señaló la necesidad de incrementar el apoyo a la teoría nuclear, una comparación entre el presupuesto de 1984 para física nuclear y el de 1979 muestra que, durante los 5 años transcurridos, los fondos para la teoría nuclear han permanecido esencialmente constantes como porcentaje del total (5,8% en 1984 frente

al 6,0% en 1979). Se cree que todavía existe una clara necesidad de un sustancial incremento relativo en el apoyo a la teoría nuclear, especialmente a la luz de las nuevas y desafiantes fronteras que se están abriendo en este campo. Entre éstas se encuentran el estudio de los núcleos lejos de la estabilidad, el estudio de la subestructura nonucleónica del núcleo, la búsqueda del plasma de quarks y gluones, y la creciente interacción entre la física nuclear y la física de partículas.

El progreso en la investigación teórica actual depende del sustancial acceso a instalaciones de cálculo de primera magnitud. Los cálculos extensivos basados en los complejos modelos que describen los experimentos actuales requieren de las amplias memorias y de la capacidad de procesamiento rápido de los computadores de Clase VI. El acceso de los teóricos nucleares a una fracción importante del tiempo disponible de un computador de Clase VI bien implementado debería cubrir inicialmente esta necesidad.

Investigación y desarrollo de aceleradores

La investigación y desarrollo de aceleradores continúa siendo vital para cubrir la necesidad de nuevas instalaciones avanzadas, por lo que debería financiarse adecuadamente. Uno de los avances más importantes ha sido la utilización con éxito de los *materiales superconductores* en los aceleradores. La superconductividad de radiofrecuencia (rf) es actualmente una tecnología bien implementa- da, con numerosas aplicaciones a la aceleración de electrones y a la aceleración y agrupamiento de haces de iones pesados. También se están investigando otras estructuras superconductoras. Por ejemplo, el Laboratorio de Física Nuclear de la Universidad de Illinois está utilizando un acelerador lineal superconductor (desarrollado en Stanford) en un microtrón, para lo que se utilizan dos aceleradores lineales superconductores de radiofrecuencia como dos postaceleradores en Argonne y en el SUNY-Stony Brook. En un área similar, los extremadamente fuertes campos magnéticos que se obtienen mediante imanes superconductores reducen el tamaño, los requerimientos de potencia y por lo tanto el coste de los ciclotrones utilizados. Se empezaron a construir dos ciclotrones superconductores a mediados de los años 70. Uno se encuentra operando actualmente en la Universidad del Estado de Michigan, mientras

que el otro, situado en el Laboratorio Nuclear de Chalk River, Canadá, será operativo en un futuro próximo.

Un tipo fundamentalmente nuevo de acelerador de iones de baja velocidad es el *cuadrupolo de radiofrecuencia,* que está siendo desarrollado en el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Basado en una teoría desarrollada originalmente en la Unión Soviética, este acelerador hace uso de técnicas avanzadas para capturar más del 90% del haz procedente de la fuente de iones. Se trata de un preacelerador extremadamente eficiente y está siendo desarrollado actualmente en diversos laboratorios de todo el mundo.

Utilizando una técnica desarrollada por los físicos de partículas, los científicos del Ciclotrón de la Universidad de Indiana están añadiendo un *refrigerador del haz* —un anillo de almacenamiento en el cual el haz acelerado es «enfriado» mediante la interacción en parte del anillo con un haz colineal de electrones de la misma velocidad— para reducir en buena parte la dispersión de energías. Esto proporcionará un nivel de precisión no alcanzado previamente para los experimentos con protones de alta energía. La técnica representa una manera efectiva de alcanzar capacidades inusuales también en otros aceleradores, y es probable que sea desarrollada extensivamente en un futuro cercano.

Se está avanzando en los estudios para idear métodos efectivos que produzcan haces de *núclidos radiactivos de vida corta* con intensidades adecuadas para los experimentos de física nuclear y astrofísica. Por ejemplo, pueden obtenerse haces radiactivos mediante un método en el cual el núcleo deseado es producido en forma de fragmento de baja energía de un blanco del haz primario en una reacción de bombardeo, después es capturado por una fuente de iones, es ionizado y, finalmente, es acelerado hasta un segundo blanco. En otro método más directo, los núcleos radiactivos emergen con energía alta a partir de un blanco primario de energía en forma de un haz secundario que puede ser utilizado como tal, o acelerado y desacelerado a diferentes energías.

El desarrollo de nuevas fuentes de iones ha avanzado mucho las últimas décadas. La *fuente de iones por resonancia-electrón-ciclotrón* y la *fuente de iones por haces de electrones,* que fueron desarrolladas inicialmente en Europa, están siendo puestas, actualmente, en funcionamiento en Estados Unidos. Estas, junto con varios esquemas de fuentes de iones inducidas por láser y fuentes de iones polarizados, constituirán importantes elementos de los futuros programas de investigación en física nuclear.

Formación de nuevos científicos

El informe Gardner sobre la calidad de la educación (*Una nación en peligro: La necesidad de una reforma educativa,* Comisión Nacional para la Calidad de la Educación, Oficina de Edición del Gobierno, Washington D.C., 1983) apunta que por primera vez en la historia de Estados Unidos, el nivel de conocimientos aprendidos por una generación no sólo no sobrepasa al de la generación previa, sino que ni siquiera se *acerca* a él. La aparición de estas deficiencias educativas en un momento en el que la demanda de una alta capacitación técnica es vital puede tener como consecuencia el que este país pierda la plaza de líder mundial en logros intelectuales, innovación técnica y beneficios materiales. El informe sostiene, además, que la seguridad de Estados Unidos depende del fomento por parte del gobierno del capital intelectual. Para mantener el nivel más elevado de éxito para sus estudiantes, los colegios y las universidades deberían ofrecer las mejores herramientas de aprendizaje.

El informe señala que: «El Gobierno Federal tiene la *responsabilidad primaria* de señalar el interés nacional en la educación. También debería financiar y apoyar los esfuerzos encaminados a proteger y promover este interés.» Recomienda que el gobierno proporcione ayuda financiera a los estudiantes, así como adiestramiento científico con un mínimo intrusismo y agobio administrativo.

Además de la disminución general de personal preparado, desde principios de los años 70, se ha observado una evidente disminución del número de estudiantes que siguen cursos de doctorado en física, y particularmente en física nuclear. Si esta tendencia continúa, la disciplina quedará desprovista de científicos preparados. Aunque las causas de esta disminución son muy diversas, se debe incluir entre ellas, sin lugar a dudas, los severos problemas financieros que padecen las universidades. Esto se traduce en una merma de la ayuda a los estudiantes, la falta de aceleradores locales dedicados a la docencia (herramientas indispensables para la física nuclear) y la reducción de nuevas plazas académicas (lo cual queda intensificado por el bajo nivel de jubilaciones en las facultades universitarias). Además, muchos de los estudiantes que *obtienen* un doctorado en física se sienten atraídos por los salarios mucho mayores que ofrece la industria y, por lo tanto, es una merma para la investigación básica.

Algunas de las recomendaciones para eliminar estas tendencias son las siguientes:

• Atraer estudiantes hacia la física nuclear mediante la financiación de programas de investigación en física nuclear para pregraduados, así como facilitar el acceso de los estudiantes de enseñanzas medias a estudios introductorios.

• Incremento, por parte de la National Science Foundation, de becas predoctorales en general, y establecimiento, por parte del Departamento de Energía, de un programa específico para física nuclear.

• Incrementar el apoyo a los nuevos programas de investigación propuestos por jóvenes científicos que se encuentran en la fase posterior al doctorado, mediante la concesión de subvenciones de 3 años.

• Aumento de las subvenciones a grupos universitarios de investigación para que sean capaces de constituir su propio equipo no académico, formado por científicos e ingenieros especializados en problemas técnicos.

• Instigar un programa temporal de subvención de puestos permanentes en las facultades para apoyar a los físicos nucleares durante esta época de bajo ritmo de jubilaciones.

• Considerar los aspectos educativos de las nuevas instalaciones allí donde sea posible. Se debería atraer a los mejores estudiantes de doctorado y proporcionarles la mejor enseñanza posible.

Isótopos estables enriquecidos

El Calutrón, en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge (ORNL), es la fuente más importante de isótopos estables de Estados Unidos, los cuales se utilizan tanto en la investigación científica como en la preparación de los radioisótopos necesarios para la investigación biomédica y la medicina clínica. Un elemento químico puede tener varios isótopos estables; el isótopo adecuado, el cual puede constituir una parte minúscula del material, debe ser cuidadosamente separado y purificado de los demás. El método de separación electromagnético que se utiliza en el ORNL se caracteriza por su versatilidad frente a los cambios de demanda. La única instalación comparable se encuentra en la Unión Soviética.

Actualmente existen agudas carestías de isótopos estables (unos 50 no son disponibles actualmente en el ORNL), y las severas deficiencias en la

financiación hacen prever un rápido deterioro en los suministros. El empeoramiento de estas carestías tendría consecuencias desastrosas en muchas áreas de la investigación científica así como en la medicina clínica, donde los isótopos estables son herramientas indispensables. La importancia de los isótopos enriquecidos en la investigación en física nuclear se deriva de las propiedades específicas del isótopo en cuestión. Virtualmente, todos los estudios nucleares requieren isótopos separados, pues las propiedades de un núcleo pueden cambiar radicalmente con la adición o sustracción de un nucleón. Consecuentemente, una prioridad importante consiste en reabastecer las reservas de isótopos antes que se resienta excesivamente la investigación en física nuclear. Para asegurar la solución del problema, deberían adoptarse vigorosas medidas correctivas, tanto por parte de las comunidades científicas afectadas como por parte de las agencias proveedoras de fondos.

Compilación de datos nucleares

Durante más de 40 años, los recopiladores y evaluadores han intentado mantener a los científicos al corriente de los datos nucleares detallados que se iban obteniendo. Sin embargo, con los rápidos avances experimentales de los dos últimos decenios, la recopilación ha empezado a quedar atrasada. La continua necesidad de evaluación puntual, efectiva y de alta calidad condujo en 1976 a la formación de una red internacional de evaluación bajo los auspicios de la Agencia Internacional de Energía Atómica. La red consta de 16 centros de datos situados en 11 países; cada centro es responsable de la evaluación de una información específica con el objeto de evitar costosas duplicaciones de esfuerzos. Todos los datos evaluados se publican en los *Nuclear Data Sheets* o *Nuclear Physics* y son introducidos en un fichero de computador denominado Evaluated Nuclear Structure Data File, que es operado por el Centro Nacional de Datos Nucleares del Laboratorio Nacional de Brookhaven. Estos datos no incluyen, sin embargo, una compilación comprensiva de las secciones eficaces de partículas cargadas, que sería de gran utilidad para muchas áreas de investigación, tanto básica como aplicada.

Además de participar en la red internacional, los cinco centros de datos de Estados Unidos coordinan sus actividades a través de la Red Estadounidense de Datos Nucleares. Estas actividades están financiadas fundamentalmente por el Departamento de Energía (DOE) y son revisadas anualmente por el Comité de Recopilación de Datos Nucleares Básicos de la Academia Nacional de Ciencias, la cual es asesora del DOE. Debido a que los costes de este programa son relativamente pequeños, un modesto incremento en los fondos aumentaría enormemente la capacidad de mantener una completa recopilación/evaluación, así como asegurar la publicación puntual en los diversos formatos requeridos tanto por los físicos nucleares como por los usuarios de los isótopos radiactivos.

Apéndice

ACELERADORES NACIONALES Y UNIVERSITARIOS DEDICADOS A LA FÍSICA NUCLEAR

Los nueve aceleradores que están dedicados a la investigación básica en física nuclear se encuentran listados en la tabla Al, mientras que la tabla A2 muestra los 13 aceleradores universitarios dedicados al mismo fin. En esta lista están incluidas aquellas instalaciones financiadas completamente para la investigación básica en física nuclear. Las instalaciones universitarias o nacionales que sólo lo están parcialmente no se han incluido.

Los aceleradores recopilados en las tablas Al y A2 son de cuatro tipos básicos: aceleradores electrostáticos de Van de Graaff, aceleradores lineales, ciclotrones y sincrotrones. Puesto que todos ellos son aceleradores de partículas cargadas, la energía de salida está dominada por el estado de carga del ion. En general, la cantidad disponible de energía por nucleón decrece al aumentar la masa del proyectil; allí donde se da un intervalo de energías en correspondencia con un intervalo de masas, la energía más alta se corresponde con la masa más baja y viceversa. La energía se expresa habitualmente en M*e*V o G*e*V por nucleón, de manera que se necesitan aproximadamente:

5 M*e*V por nucleón para vencer la barrera de Coulomb.
10 M*e*V por nucleón para producir excitaciones moderadas de la materia nuclear.
100 M*e*V por nucleón para producir piones y altas temperaturas nucleares.
1 G*e*V por nucleón para producir altas densidades de energía nuclear y la formación de estados exóticos de la misma.

Tal como se describe en el capítulo 1, estas energías pueden ser clasificadas en categorías de la siguiente forma:

Baja energía: menos de 10 M*e*V por nucleón.
Energía intermedia 10 a 100 M*e*V por nucleón.
Alta energía: 100 M*e*V a 1 G*e*V por nucleón.

Energía relativista: mayores que 1 G*e*V por nucleón (los electrones se convierten en relativistas a unos 0,5 M*e*V).

Es importante tener en cuenta que este esquema de clasificación no está aceptado comúnmente por diversas razones, tanto técnicas como históricas; así pues, la interpretación de los tres primeros términos varía considerablemente entre los diversos grupos de físicos.

La siguiente clasificación de los proyectiles es útil pero igualmente arbitraria. Los iones de hidrógeno (protones, deuterones y tritones) y los iones de helio (masas 3 y 4) son considerados como los *iones ligeros.* La categoría de los *iones medios* empieza con los iones de litio (masas 6 y 7), que a veces están incluidos en la definición de iones ligeros, y se extiende hasta masa 40. Por encima de masa 40, los proyectiles se consideran como *iones pesados.*

Tabla A1. Aceleradores nacionales

Equipo	*Tipo acelerador*	*Haces y energías*	*Mejoras planeadas*	*Problemas típicos de investigación*
MUY GRANDE				
Complejo Bevalac, Laboratorio Lawrence Berkeley	Sincrotón (Bevatrón) inyectado mediante un acelerador lineal de iones pesados (SuperHILAC)	Iones ligeros y pesados hasta $A = 238$; en el SuperHILAC, 8,5 MeV/N; en el Bevatrón, $A = 4\text{-}238$, hasta 2,1-0,96 GeV/N	Preacelerador cuadrupolar de radiofrecuencia; detector electrónico para todo ángulo sólido	Reacciones con iones pesados relativistas; colisiones centrales y periféricas; explosiones de núcleos comprimidos; medidas del tamaño del volumen de interacción; producción de piones y partículas con extrañeza; formas exóticas de la materia nuclear
Equipo para Física de Mesones de Los Alamos, Laboratorio Nacional de Los Alamos	Acelerador lineal	Protones; haces secundarios de piones, muones y neutrinos; H^+, 800 MeV; H^-, 212-800 MeV, polarizados o sin polarizar; muones y piones hasta 400 MeV	Anillo de almacenamiento de protones; espectrómetro de tiempo de vuelo; espectrómetro de piones de baja energía	Interacciones nucleón-nucleón, protón-núcleo y pion-núcleo; interacciones débiles; átomos piónicos y muónicos; excitación selectiva de estados protón/neutrón; resonancias gigantes; tiempo de vuelo de neutrones
GRANDES				
Acelerador Lineal Bates, Instituto de Tecnología de Massachusetts	Acelerador lineal de electrones con recirculador	Electrones, fotones de frenado; 400 MeV a alta intensidad en el primer paso; recirculado, 50-725 MeV	Haces polarizados; espectrómetro BIGBITE; haces compartidos	Estudios de alta resolución de la estructura nuclear: estructura eléctrica y magnética de los núcleos; movimiento de piones en el interior del núcleo; papel de los estados excitados de los nucleones en la estructura nuclear; dispersión inelástica profunda de electrones; violación de la paridad
Equipo de ciclotrones de la Universidad de Indiana (IUCF), Universidad de Indiana	Ciclotrones isocronos con preinyector	Iones ligeros, hasta $A = 7$; protones y deuterones, polarizados y sin polarizar; p hasta 214 MeV; d hasta 45 MeV/N; $A = 3\text{-}7$, hasta 90-25 MeV/N	Sistema electrométrico de brazo dual; anillo de almacenamiento con enfriamiento por electrones	Dependencia del spin y del isospín de las interacciones de Gamow-Teller; estructura nuclear para transferencia de grandes cantidades de momento; producción de piones; captura radiactiva; sistemas de pocos nucleones; simetría de carga de las fuerzas nucleares; fisión a partir de excitaciones elevadas

Tabla A1. Aceleradores nacionales *(Continúa)*

Equipo	*Tipo acelerador*	*Haces y energías*	*Mejoras planeadas*	*Problemas típicos de investigación*
Ciclotrón Nacional Superconductor (NSCL), Universidad Estatal de Michigan	Ciclotrón superconductor, Fase I, $K = 500$	Iones ligeros a medianos, hasta $A = 40$; iones ligeros, 10-35 MeV/N; $A = 14$ a 40, hasta 40-12 MeV/N	Ciclotrón superconductor, Fase II, $K = 800$	Mecanismos de reacción de iones pesados a energías intermedias; descomposición de la materia nuclear en las reacciones de iones pesados; rotaciones de cambio de spin; intensidad de Gamow-Teller; estados con huecos fuertemente ligados y resonancias gigantes; núcleos exóticos
MEDIO				
Sistema de Aceleraciones Lineales en Serie de Argonne (ATLAS), Laboratorio Nacional de Argonne	Van de Graaff de 9 −MV en serie con un acelerador lineal superconductor	Iones ligeros a pesados, hasta $A = 100$; $A = 6$-20, hasta 11-10 MeV/N; $A = 40$-100, hasta 8,5-5 MeV/N	Resonadores adicionales	Fusión de iones pesados a energías intermedias; fenómenos de resonancia en la formación de cuasimoléculas dinucleares; deformación nuclear en los estados de spin elevado; QED y efectos relativistas en los niveles energéticos del núcleo
Equipo MP doble en serie, Laboratorio Nacional de Brookhaven	Dos Van de Graaff MP en serie, de 16 y 12 MV, acoplados para dar uno equivalente de 20 MV	Iones ligeros a pesados, hasta $A = 238$, $A = 6$-32, 13-10 MeV/N; $A = 35$-238, hasta 7,5-3,3 MeV/N	Línea de transferencia a un Sincrotón de Gradiente Alternante (AGS) para proporcionar haces de hasta 15 GeV/N con A por encima de $A = 32$	Fusión de iones pesados; estudios de evaporación; nuevas actividades beta a partir de núcleos exóticos; orbitales moleculares en los núcleos ligeros; espectroscopia gamma de estados de spin alto; reacciones de iones pesados relativistas
Ciclotrón de 88 pulgadas, Laboratorio Lawrence Berkeley	Ciclotrón isocrono, $K = 160$	Iones ligeros a medianos, hasta $A = 40$; protones y deuterones, polarizados hasta 55 MeV; $A = 2$-40, hasta 32-6 MeV/N	Fuente de iones por resonancia ciclotrón electrón	Inicio de la fragmentación en las reacciones de iones pesados; núcleos exóticos; resonancias dipolares gigantes a spin alto; momentos de inercia cerca del valor de cuerpo rígido; fenómenos de polarización del spin
Equipo de Investigación sobre iones pesados Holifield (HHIRF), Laboratorio Nacional de Oak Ridge	Ciclotrón isocrono con inyector de 25 MV	Iones ligeros a pesados, hasta $A = 197$; $A = 4$-40, hasta 25 MeV/N; $A = 56$ a 197, hasta 18-4 MeV/N	Mejora de la fuente de iones; haces de iones; blanco en forma de chorro de gas polarizado láser	Espectroscopia de rayos gamma; estados de spin intermedios y altos; reacciones de iones pesados; estudios de núcleos radiactivos de vida corta producidos durante las reacciones de iones pesados

Tabla A2. Aceleradores universitarios dedicados a la física nuclear*

Universidad	*Tipo acelerador*	*Haces y energías*	*Mejoras planeadas*	*Problemas típicos de investigación*
Instituto de Tecnología de California	Serie EN de 6,5 MV, JN Van de Graaff 1,2 MV, 3,3 MV pelletrón	Iones ligeros a intermedios, $A = 40$		Ritmos de reacciones astrofísicas; captura radiactiva; fusión de iones pesados; búsqueda de partículas cargadas de carga fraccionaria
Universidad Estatal de Florida	9 MV super FN tándem Van de Graaff	Iones ligeros y medios, hasta $A = 60$; para $A = 40$, hasta 3 MeV/N	Acelerador superconductor lineal; fuente de iones alcalinos polarizados; capacidad hasta $A = 40$ y hasta 10 MeV/N	Reacciones de transferencia de iones ligeros; resonancias inducidas por iones pesados; fusión y medidas de secciones eficaces de reacción total; estreptocopia de rayos gamma con iones pesados
Universidad de Illinois, Urbana	Inyector de 2 MV Van de Graaff y acelerador lineal superconductor con microtrón de 6 pistas	Electrones hasta 70 MeV	Microtrón de 9 pistas, hasta más de 100 MeV; microtrón de 2 fases, hasta 280 MeV	Emisión correlacionada de nucleones después de la absorción de fotones; medidas de coincidencia de dispersión de electrones; fluorescencia resonante
Universidad de Nôtre-Dame	9 MV FN tándem Van de Graaff con inyector electrostático de 3 MV	Protones y deuterones polarizados y sin polarizar, 18 MeV; iones ligeros a medianos, hasta $A = 28$; $A = 6$-28, 20-5 MeV/N		Determinación de spin y paridad; energías de reacción nucleares; transiciones de rayos gamma desde estados colectivos de iones pesados de spin elevado; fusión total de iones pesados
Universidad de Pennsylvania	FN tándem Van de Graaff	Iones ligeros a pesados, hasta el Cu; protones y deuterones, 18 MeV; iones medios hasta 6 MeV/N		Reacciones de transferencia de iones ligeros; resonancias inducidas por iones pesados; medidas angulares de correlación; materia condensada; dispersión elástica e inelástica de iones pesados; espectrometría de masas con aceleradores

Tabla A2. Aceleradores universitarios dedicados a la física nuclear* *(Continúa)*

Universidad	*Tipo acelerador*	*Haces y energías*	*Mejoras planeadas*	*Problemas típicos de investigación*
Universidad de Princeton	Ciclotrón AVF	Protones hasta 50 MeV; deuterones hasta 30 MeV; iones ligeros, 15 a 20 MeV/N	Mejora del diagnóstico de los haces y ajuste del ciclotrón	Espectroscopia de alta resolución con partículas cargadas; producción de isótopos radiactivos; estudios de paridad; estudios de inversión temporal; interacciones fuertes y débiles
Universidad de Rochester	13 MV MP tándem Van de Graaff	Iones ligeros a pesados, hasta $A=93$; protones y deuterones hasta 25 MeV; $A=6\text{-}93$, 9-2,8 MeV/N		Espectometría de masas; búsqueda de quarks, neutrinos solares; cargas fraccionarias; programas aplicados; mecanismos de reacciones con iones pesados; espectroscopia de rayos gamma; resonancias moleculares en reacciones con iones pesados; estados de spin elevado; reacciones profundas inelásticas; espectroscopia láser
Universidad de Rutgers	8 MV FN tándem Van de Graaff	Iones pesados a ligeros, hasta el Fe; protones polarizados y deuterones	Aislamiento gaseoso con SF_6; inflexión de 90° en la fuente; fuente de iones de corriente alta	Espectroscopia nuclear; estados de spin intermedio y alto; espectroscopia hiperfina; interacciones con haces láser; polarización nuclear y atómica; no conservación de la paridad; espectometría de masas de alta energía
Universidad Estatal de Nueva York, Stony Brook	9 MV Van de Graaff tándem acelerador lineal superconductor	Iones medios hasta 7 MeV/N	Aumento continuo de masas y energías de los proyectiles hasta alcanzar $A=100$, 10-5 MeV	Mecanismos de reacción con iones pesados de energía intermedia; espectroscopia con estados de spin elevado; resonancias nucleares moleculares; espectroscopia hiperfina de núcleos excitados
Universidad de Texas A&M	Ciclotrón isócrono, $K=147$	Iones ligeros hasta medianos. $A=40$; protones y deuterones polarizados, hasta 55 MeV; iones ligeros hasta 32 MeV/N; $A=12\text{-}40$, 26-8 MeV/N	Ciclotrón superconductor, $K=500$, como inyector del actual ciclotrón	Medidas de alta precisión de estados de resonancia gigante; violación de la paridad en interacciones hadrónicas débiles; medidas de masa de núcleos exóticos; compresibilidad nuclear; configuraciones en forma de agrupación; fusión incompleta

Tabla A2. Aceleradores universitarios dedicados a la física nuclear* *(Continúa)*

Laboratorio Nuclear de 1 Triángulo de Universidades (TUNL), Universidad Duke	Ciclotrón con sector enfocado inyectando a FN y Van de Graaff en serie	Protones, deuterones y neutrones; p hasta 31 MeV; d hasta 24 MeV; p y d polarizados hasta 16 MeV	Blanco criogénico polarizado; nueva fuente de iones polarizados	Procesos nucleares utilizando iones ligeros y neutrones como proyectiles: resonancias con partículas cargadas con resolución energética muy elevada. captura radiactiva; estudios de polarización; secciones eficaces de dispersión de neutrones
Universidad de Washington	Dos Van de Graaff FN: inyector de 7 MV, tándem 9 MV	Iones ligeros a medianos, hasta $A = 28$; protones y deuterones polarizados y sin polarizar, 24 MeV; iones ligeros, 12-7 MeV/N; $A = 12$-28,5 a 3,5 MeV/N	Acelerador lineal superconductor para proporcionar energías suplementarias; nueva fuente de iones polarizados	Fuerza débil nucleón-nucleón y electrón-nucleón; conservación de la carga de los nucleones; rotura de la simetría de isopín; efectos relativistas de la ecuación de ondas; mecanismos de reacción de iones pesados
Universidad de Yale	13 MV MP tándem Van de Graaff	Iones ligeros a pesados, hasta $A = 93$; protones y deuterones, 27 MeV; $A = 6$-93, 9-2,8 MeV/N	22 MV ESTU tándem; espectrómetro magnético de gran ángulo sólido	Resonancias moleculares nucleares en las interacciones con iones pesados; nuevas simetrías y simplificaciones en un sistema de muchos cuerpos dentro del marco del modelo de bosones interactivos; interacción iones superficies; astrofísica nuclear

(*) Se han incluido aquellas instalaciones que están completamente dedicadas a la investigación básica en física nuclear y los equipos universitarios adicionales que sólo lo están parcialmente.

Bibliografía

Los artículos y libros citados a continuación proporcionan información detallada de algunos de los temas introducidos en este libro. Están escritos en un lenguaje fácilmente comprensible para una persona de nivel cultural medio y, asimismo, resultan interesantes para aquellas personas con formación científica que ***no*** son especialistas en física nuclear. También existen muchos excelentes libros sobre física de partículas elementales, astronomía y cosmología, muchos de los cuales contienen material interesante sobre física nuclear y sus conexiones con otras ciencias.

Artículos aparecidos en el «Scientific American»

G. F. Bertsch, «Vibrations of the Atomic Nucleus», mayo 1983, pág. 62.
D. A. Bromley, «Nuclear Molecules», diciembre 1978, pág. 58.

J. Cerny y A. M. Poskanzer, «Exotic Light Nuclei», junio 1978, pág. 60.

K. A. Johnson, «The Bag Model of Quark Confinement», julio 1979, página 112.

W. C. McHarris y J. O. Rasmussen, «High-Energy Collisions between Atomic Nuclei», enero 1984, pág. 58.

C. Rebbi, «The Lattice Theory of Quark Confinement», febrero 1983, página 54.

D. N. Schramm, «The Age of the Elements», enero 1974, pág. 69.

R. R. Wilson, «The Next Generation of Particle Accelerators», enero 1980, pág. 42.

C. D. Zafiratos, «The Texture of Nuclear Surface», octubre 1972, pág. 100.

Libros

I. Asimov, ***The History of Physics,*** Walker and Company, New York, 1984.

Esta amena revisión de todo el campo de la física, escrita desde una perspectiva histórica, contiene seis capítulos que tratan varios aspectos de la física nuclear básica. Publicado originalmente en 1966 como una serie

de tres volúmenes denominada ***Understanding Physics,*** ha sido reeditado como un único volumen con un título nuevo. Desgraciadamente, no ha sido puesto al día, excepto en lo que se refiere a un apéndice sobre los desarrollos más recientes de la física de partículas elementales. Sin embargo, todavía es una excelente introducción a la física.

P. E. Hodgson, ***Growth Points in Nuclear Physics,*** Pergamon Press, Oxford. Vol. 1, 1980; Vol. 2, 1980; Vol. 3, 1981.

Cada uno de estos breves libros contiene varias docenas de artículos cortos sobre temas actuales de investigación, escritos para no especialistas y publicados originalmente en ***Nature, New Scientist*** y ***Physics Bulletin.*** Proporcionan excelentes panoramas del campo de la física nuclear tal como se concebía hace unos cuantos años. Desgraciadamente, la serie no ha sido continuada.

P. F. Schewe, ed., ***Physics News in 1983,*** Instituto Americano de Física, New York, 1983.

Éste es el número quince de una serie de breves libros anuales que contienen unas cuantas docenas de artículos sobre desarrollos interesantes que se han producido en física durante el último año. Al igual que la serie de Hodgson citada anteriormente, los artículos están dirigidos a no especialistas, pero en este caso el tema incluye no solamente la física nuclear, sino toda la física. Los volúmenes se publican en noviembre y pueden obtenerse a través del Instituto Americano de Física.

J. S. Trefil, ***From Atoms to Quarks,*** Charles Scribner's Sons, New York, 1980.

Aunque el énfasis de este libro se sitúa en la física de partículas elementales, se incluyen varios capítulos que tratan sobre la física nuclear y los aceleradores. Éste es uno de los diversos y excelentes libros del autor, escritos para no especialistas.

S. Weinberg, ***The First Three Minutes,*** Basic Books, New York, 1977.

Escrito para el hombre de la calle, este clásico-moderno escrito por uno de los creadores de la síntesis electrodébil describe con detalle la evolución del Universo desde el momento de la gran explosión hasta el comienzo de la nucleosíntesis unos tres minutos después. Actualmente existe un cierto

número de excelentes y modernos libros sobre este tema, pero éste continúa siendo el mejor de todos ellos.

Glosario

ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

AGS	Alternating Gradient Synchrotron (Sincrotrón de Gradiente Alternativo), Laboratorio Nacional de Brookhaven.
ATLAS	Argonne Tándem Linear Accelerator System (Sistema de Aceleradores Lineales en Tándem de Argonne), Laboratorio Nacional de Argonne.
CEBAF	Continuous Electron Beam Accelerator Facility (Equipo Acelerador Continuo de Haces de Electrones), su construcción está propuesta en Newport News, Virginia. (Denominado inicialmente National Electron Accelerator Laboratory [Laboratorio Nacional de Aceleración de Electrones] NEAL).
CEN	Centre d'Etudes Nucléaires (Centro de Estudios Nucleares) de Saclay, Gif-sur-Yvette, Francia.
CERN	Centre Européenne pour la Recherche Nucléaire (Centro Europeo para la Investigación Nuclear; también denominado Laboratorio Europeo de Física de Partículas), Ginebra, Suiza.
DDHF	Método de Hartree-Fock dependiente de la Densidad
DOE	Department of Energy (Departamento de Energía)
*e*V	electrónvoltio
fm	fermi (10^{-15} m)
GANIL	Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (Gran Acelerador Nacional de Iones Pesados), Caen, Francia
G*e*V	Gigaelectronvoltio (10^9 *e*V)
GSI	Gesellschaft für Schwerionenforschung (Laboratorio de Investigación de Iones Pesados), Darmstadt, Alemania Occidental
HHIRF	Holifield Heavy Ion Research Facility (Equipo de Investigación sobre Iones Pesados de Holifield), Laboratorio Nacional de Oak Ridge

IUCF	Indiana University Cyclotron Facility (Equipo Ciclotrón de la Universidad de Indiana).
JACEE	Japanese-American Cooperative Emulsión Experiment (Experimento Cooperativo Americano-Nipón con Emulsiones).
JINR	Joint Institute for Nuclear Research (Instituto Conjunto para la Investigación Nuclear), Dubna, URSS
KEK	Kokuritsu Ko-Enerugii Butsurigaku Kenkyusho (Laboratorio Nacional de Física de Altas Energías), Tsukuba, Japón.
k*e*V	kiloelectronvoltio (10^3 *e*V).
km	kilómetro.
LAMPF	Los Alamos Mesón Physics Facility (Equipo de Física de Mesones de Los Alamos), Laboratorio Nacional de Los Alamos.
LEAR	Low-Energy Antiproton Ring (Anillo de Antiprotones de Baja Energía) del CERN.
M*e*V	Megaelectronvoltio (10^6 *e*V).
ms	milisegundo.
NSAC	Nuclear Science Advisory Committee (Comisión Asesora de Ciencia Nuclear) del Departamento de Energía de la NSF.
NSCL	National Superconducting Cyclotron Laboratory (Ciclotrón Superconductor Nacional, Universidad Estatal de Michigan).
NSF	National Science Foundation (Fundación Nacional para la Ciencia), Estados Unidos.
QCD	Cromodinámica Cuántica.
QED	Electrodinámica Cuántica.
QHD	Hadrodinámica Cuántica
RNC	Colisionador Nuclear Relativista.
SIN	Swiss Institute of Nuclear Research (Instituto Suizo de Investigación Nuclear), Villigen, Suiza.
SLAC	Stanford Linear Accelerator Center (Acelerador Lineal de Stanford).

SURA	Southeastern Universities Research Association (Asociación para la Investigación de las Universidades del Sureste).
T*e*V	Teraelectronvoltio (10^{12} *e*V).
TRIUMF	Tri-University Mesón Facility (Equipo de Mesones de las Tres Universidades) Vancouver, Columbia Británica, Canadá.
TUNL	Triangle Universities Nuclear Laboratory. Universidad Duke.
V	Voltio.

Términos técnicos

Acelerador. Máquina diseñada para acelerar partículas cargadas hasta una energía adecuada para bombardear un blanco y estudiar las reacciones nucleares resultantes. Los cuatro tipos más importantes de acelerador son los aceleradores electrostáticos de Van de Graaff, los aceleradores lineales, los ciclotrones y los sincrotrones.

Acelerador de haces colisionantes. Acelerador en el cual las partículas de los haces que se mueven en sentido contrario colisionan durante el vuelo.

Acelerador electrostático. Véase *Acelerador electrostático de Van de Graaff.*

Acelerador electrostático de Van de Graaff. Un tipo de acelerador en el cual las partículas cargadas reciben un único pulso de energía al pasar a través de una caída de potencial electrostático muy grande.

Acelerador lineal. Un tipo de acelerador en el cual las partículas cargadas siguen una trayectoria recta a medida que reciben pulsos de energía repetidos mediante una serie de campos eléctricos.

Altas energías. Para los propósitos de este informe, las energías de los proyectiles (más bien arbitrarias) comprendidas entre 100 M*e*V por nucleón y 1 G*e*V por nucleón. Véase también *Energía relativista*.

Antimateria. Materia compuesta de antipartículas (por ejemplo, positrones y antinucleones) en lugar de partículas ordinarias.

Antipartículas. Una partícula que es idéntica a las ordinarias en todos los aspectos salvo que posee una cierta propiedad elemental opuesta, como la carga. Cada partícula posee su antipartícula; algunas partículas son sus propias antipartículas.

Átomo. La unidad más pequeña de un elemento químico, que consiste de un núcleo central rodeado por electrones orbitales. Se mantiene unido gracias a la fuerza electromagnética.

Baja energía. Para los propósitos de este informe, la energía de un proyectil (de forma arbitraria) de menos de 10 M*e*V por nucleón.

Barión. Una de las dos clases de hadrones. Está formado por tres quarks y tres antiquarks confinados en una bolsa. Todos los bariones son fermiones; los tres tipos más importantes son los nucleones, los hiperones y las resonancias bariónicas. Véase también *Mesón.*

Barrera de Coulomb. La fuerza repulsiva de Coulomb que se ejerce entre un núcleo blanco y un proyectil cargados positivamente, inhibiendo su contacto.

Bosón. Partícula o grupo de partículas (tales como un núcleo) que poseen un valor entero del spin. Entre los bosones se encuentran, además de los bosones vectoriales, los mesones. El principio de exclusión de Pauli no se aplica a ellos.

Bosón vectorial. Cualquier bosón de spin 1 que actúa como transporte de la fuerza entre dos partículas. Véase también *Partícula virtual.*

Bosones vectoriales elementales. Una de las tres clases de partículas elementales, formadas por fotones, gluones y los bosones vectoriales intermediarios; estas partículas son las que transportan las fuerzas fundamentales. Véase también *Leptón* y *Quark.*

Bosones vectoriales intermedios. Una de las tres partículas masivas, cargadas o neutras, que transportan la fuerza débil. Designadas como W^+, W^- y Z^0, son bosones vectoriales elementales, como lo son los fotones y los gluones.

Ciclotrón. Acelerador circular en el cual las partículas siguen una trayectoria espiral desde el centro hacia el exterior de la máquina a medida que reciben pulsos de energía mediante un campo eléctrico alternante en un campo magnético fijo.

Colisión central. Colisión frontal de dos partículas, con máximo solapamiento de sus secciones transversales; el parámetro de impacto es casi cero.

Color. Nombre de una propiedad adscrita a los quarks y gluones que es ligeramente similar a la carga eléctrica. Existen tres colores.

Confinamiento de los quarks. La observación de que es aparentemente imposible, bajo condiciones ordinarias, que los quarks escapen de sus bolsas hadrónicas y existan como partículas libres. Véase también *Libertad asintótica.*

Corriente. Véase *Corriente de intercambio.*

Corriente de intercambio. La corriente, bien cargada o neutra, que surge del intercambio de partículas virtuales o neutras que ejercen la fuerza entre dos partículas.

Cromodinámica cuántica (QCD). La teoría cuántica de campos de la interacción de color entre quarks y gluones. También es conocida de forma simple como la teoría cuántica de campos de la interacción fuerte, la cual procede de la interacción de color.

Cuanto. La unidad más pequeña posible de energía asociada con cualquier cambio en un sistema físico. El ejemplo mejor conocido de un cuanto de energía es el fotón.

Desintegración. Cualquier proceso en el que un núcleo radiactivo o una partícula inestable o sistema cambia hacia otra forma de menor energía emitiendo una o más partículas o rayos gamma.

Detector. Cualquier instrumento que puede detectar la presencia de una partícula o fragmento nuclear producido en una reacción nuclear, y medir una o más de sus propiedades físicas.

Deuterio. El núcleo de deuterio (hidrógeno-2), formado por un protón y un neutrón.

Dispersión inelástica profunda. Una colisión no central en la cual una gran cantidad de la energía de colisión se convierte en energía interna de los núcleos.

Ecuación de estado. Una ecuación matemática que describe el comportamiento de un sistema físico sobre un amplio rango de condiciones, sobre la base de unas pocas cantidades medibles denominadas variables de estado.

Electrodinámica cuántica (QED). La teoría cuántica de campos de la interacción electromagnética entre cualquier partícula con propiedades eléctricas o magnéticas.

Electrón. Leptón ligero cargado negativamente cuya masa es de 0,511 MeV, o sea alrededor de 1/1.840 de la de un nucleón. Véase también *Partícula beta, Positrón, Muon* y *Tauón.*

Electrónvoltio (eV). Cantidad de energía adquirida por cualquier partícula con una unidad de carga eléctrica cuando es acelerada a través de una diferencia de potencial de 1 voltio. Se utiliza en forma de varios múltiplos, tales como k*e*V, M*e*V o G*e*V, para medir la energía de un haz, o la masa en reposo y la temperatura.

Energía de ligadura. Una medida del grado con que está ligado un sistema físico; es la cantidad de energía necesaria para romper el enlace en cuestión y separar las partículas.

Energía media. Para los propósitos de este informe una energía del proyectil (de forma arbitraria) comprendida entre 10 y 100 M*e*V por nucleón.

Energía relativista. Una energía de proyectil mayor que 1 G*e*V por nucleón, es decir, una energía comparable o superior a la masa en reposo de la partícula.

Espectroscopia nuclear. Estudio de la estructura detallada de los núcleos, es decir, su espectro de niveles energéticos, asociados con las propiedades físicas, modos de desintegración, y otras propiedades.

Estado excitado. Cualquier nivel energético de un sistema ligado de partículas, tal como un núcleo, por encima del estado fundamental.

Estado fundamental. El nivel de energía más bajo (normal) de un sistema ligado de partículas, tal como el núcleo. Véase también *Estado excitado.*

Equivalencia masa-energía. El principio que establece que la masa y la energía son cantidades interconvertibles. En física nuclear, las masas se expresan habitualmente en forma de una energía equivalente, normalmente en unidades de M*e*V.

Extrañeza. La propiedad asociada con el quark extraño o cualquier partícula conteniendo un quark extraño.

Fermi. Nombre habitual del fentómetro (10^{-15} metros), la dimensión característica de la física nuclear y de partículas. El diámetro de un nucleón es de un fermi aproximadamente.

Fermión. Cualquier partícula o grupo de partículas (tales como un núcleo) que poseen un valor semientero del spin. Todos los leptones, quarks y

bariones son fermiones. El principio de exclusión de Pauli se aplica únicamente a los fermiones.

Fisión. El proceso (bien sea espontáneo o inducido) en el cual un núcleo de un elemento pesado, tal como el uranio, se rompe en dos núcleos más ligeros con desprendimiento de energía. Véase también *Fusión.*

Fisión espontánea. Véase *Fisión.*

Fuerza de color. La fuerza a través de la cual interactúan los quarks y los gluones, mediante el intercambio de estos últimos. Constituye la base de la cromodinámica cuántica. Véase también la *Fuerza fuerte.*

Fuerza de Coulomb. La fuerza de atracción o repulsión eléctrica entre partículas de carga diferente o igual respectivamente.

Fuerza débil. Una componente de la unificada fuerza electrodébil, responsable de la desintegración de muchos núclidos radiactivos y partículas inestables y de todas las interacciones de los neutrinos. Es experimentada por todos los leptones, quarks y hadrones, a través del intercambio de bosones vectoriales intermediarios. Véase también *Fuerza electromagnética.*

Fuerza electrodébil. Una de las tres fuerzas fundamentales que comprende las acciones de las fuerzas electromagnéticas y débiles, cuya unificación reveló que no eran más que dos aspectos de una misma fuerza subyacente. Véase también *Gravitación* y *Fuerza fuerte.*

Fuerza electromagnética. Una componente de la unificada fuerza electrodébil, responsable de mantener a los átomos unidos y de otros muchos fenómenos. La experimentan todas las partículas que poseen una carga eléctrica o momento magnético, mediante el intercambio de fotones. Véase también la *Fuerza débil.*

Fuerza electrostática. Véase *Fuerza de Coulomb.*

Fuerza fuerte. Una de las tres fuerzas fundamentales, responsables de mantener al núcleo unido. Es experimentada por todos los hadrones a través del intercambio de mesones y es, en realidad, el vestigio de la fuerza de color mucho más fuerte entre quarks y gluones. Véase también *Fuerza electrodébil* y *Gravitación.*

Fusión. Proceso en el cual dos núcleos de elementos ligeros, tales como hidrógeno o helio, se fusionan para formar un núcleo más pesado, con

desprendimiento de energía. También es el proceso en el que dos núcleos más pesados se fusionan para formar un núcleo compuesto, el cual puede o no romperse rápidamente en dos. Véase también *Fisión.*

Gluon. Cualquiera de las ocho partículas carentes de masa y que poseen color que transportan la fuerza de color. Son bosones vectoriales elementales y se encuentran confinados en las bolsas hadrónicas.

Gravitación. Una de las tres fuerzas fundamentales responsables de la estructura a gran escala del Universo. La experimentan todas las partículas, pero es tan extremadamente débil que su efecto es despreciable excepto en los objetos macroscópicos. Véase también *Fuerza electrodébil* y *Fuerza fuerte.*

Hadrodinámica cuántica (QHD). Un modelo de la teoría cuántica de campos que intenta explicar las acciones de la fuerza fuerte en términos de los propios hadrones en lugar de los quarks y gluones.

Hadrón. Cualquier partícula que experimenta la fuerza fuerte. Las dos clases de hadrones son bariones y mesones.

Hipernúcleo. Cualquier núcleo en el que un nucleón ha sido reemplazado por un hiperón.

Hiperón. Cualquier barión que contenga uno o más quarks extraños; el más corriente de estos bariones es el hiperón lambda.

Invariancia frente a la inversión temporal. Un principio fundamental de simetría que gobierna la naturaleza de las leyes físicas cuando la dirección del transcurso del tiempo se invierte.

Ion. En general, cualquier átomo que ha perdido o ganado uno o más electrones. En física nuclear, especialmente en conexión con los aceleradores, el término se utiliza como sinónimo de núcleo, debido a que son acelerados con algunos electrones todavía ligados; los núcleos carentes de electrones también son considerados iones.

Ion ligero. Cualquier ion de hidrógeno o de helio. Los iones de litio a veces están incluidos en esta categoría.

Ion medio. Cualquier ion comprendido entre el litio y un número másico de 40; esta definición es arbitraria pero conveniente.

Ion pesado. Cualquier ion con un número másico mayor que 40; esta definición es arbitraria pero conveniente.

Isospín. Un número cuántico adscrito a los hadrones que permite agruparlos de maneras sencillas, tales como un nucleón generalizado que en los diferentes estados de isospín son o bien un protón o un neutrón.

Isótopo. Cualquier núcleo específico de un elemento químico. Los isótopos de un elemento (el cual se define por su número de protones) difieren unos de otros por su número de neutrones. Ver también *Núclido.*

Kaón. Un mesón extraño, es decir, uno que contiene un quark extraño. Al igual que los piones, los kaones pueden ser positivos, negativos o neutros.

Leptón. Una de las tres clases de partículas elementales, formada por electrones, muones, tauones, sus neutrinos asociados, y las seis partículas asociadas. Todos los 12 leptones son fermiones; interactúan vía la fuerza débil pero no la fuerza fuerte. Véase también *Bosón vectorial elemental* y *Quark.*

Ley de conservación. Una ley que establece que en cada interacción concebible, la cantidad total de una cierta magnitud (por ejemplo, la carga eléctrica o la masa-energía) no puede cambiar, es decir, la cantidad se conserva.

Libertad asintótica. Un fenómeno en el cual la intensidad de la fuerza de color entre quarks tiende a cero cuando éstos están muy cerca y que aumenta cuando se alejan. Véase también *Confinamiento de los quarks.*

Masa en reposo. La masa en reposo de una partícula cuando se mueve con respecto a algún sistema de referencia (tal como el laboratorio). La masa de una partícula en movimiento es mayor que su masa en reposo. Véase también *Energía relativista.*

Materia hadrónica. Un estado de la materia nuclear que comprende a los núcleos normales así como las resonancias bariónicas y otros bariones no nucleónicos.

Materia nuclear. Materia que consiste primariamente de nucleones, bien en un núcleo atómico o en un estado extenso como las estrellas de neutrones.

Mecánica cuántica. La teoría física que trata todos los fenómenos a nivel de moléculas, átomos, núcleos y partículas elementales.

Mesón. Una de las dos clases de hadrones, está formado por un quark y un antiquark confinados en una bolsa. Todos los mesones son bosones; entre los más comunes se encuentran los piones y los kaones. Los mesones son los principales transmisores de la fuerza fuerte entre hadrones. Véase también *Barión.*

Modelo colectivo. Cualquier modelo de estructura nuclear en la que los núcleos se tratan como si estuvieran moviéndose concertadamente bajo la fuerza de alguna fuerza. Véase también *Modelo de la gota líquida.*

Modelo de bolsa. Modelo de estructura hadrónica que ve los hadrones como una bolsa impenetrable de la que sus componentes, los quarks, no pueden escapar bajo condiciones ordinarias. Véase también *Confinamiento de los quarks.*

Modelo de intercambio de mesones. Un modelo de interacciones nucleares que tiene en cuenta los efectos del intercambio de mesones virtuales entre nucleones, en lugar de considerar que los núcleos están compuestos únicamente por nucleones.

Modelo de la gota líquida. Un modelo colectivo en el cual las propiedades del núcleo son vistas en términos de analogía con las de una gota normal de líquido.

Modelo de partículas independientes. Cualquier modelo de estructura nuclear en la que el movimiento de un simple nucleón se ve en términos de un campo de fuerzas promedio producido por todos los demás nucleones. Véase también *Modelo en capas.*

Modelo en capas. Un modelo de partículas independientes en el cual los nucleones son vistos como ocupando una serie de capas análogas a las de los electrones en la teoría de la estructura atómica.

Modelo estándar. Las combinadas (pero todavía no unificadas) teorías de la interacción electrodébil y de la cromodinámica cuántica, con las que todos los hechos conocidos de la física son consistentes.

Muon. Leptón moderadamente masivo de carga negativa que parece ser idéntico al electrón en todos los aspectos excepto por su mayor masa. Véase también *Tauón.*

Neutrino. Cualquiera de los tres tipos de leptones neutros, presumiblemente sin masa, que son emitidos en los procesos de interacción débil, tales como la desintegración beta.

Neutrón. Un barión no cargado (neutro) cuya masa es casi idéntica a la del protón.

Núcleo. La parte densa, pequeña, cargada positivamente de un átomo, formada primariamente por nucleones (protones y neutrones). Se mantiene unido por la fuerza fuerte, a través del intercambio de mesones entre nucleones. Véase también *Ion.*

Núcleo compuesto. Núcleo pesado formado por la colisión de dos núcleos más ligeros. Véase también *Fusión.*

Nucleón. Un protón o un neutrón; los nucleones son los menos masivos y más estables de los bariones.

Núclido. Cualquier núcleo específico, definido como una combinación única del número de protones y de neutrones. Véase también *Isótopo.*

Número atómico, Z. El número de protones en un núcleo atómico.

Número de neutrones, N. El número de neutrones en un núcleo atómico.

Número de protones, Z. El número de protones en un núcleo atómico.

Número másico, A. El número de protones más neutrones $(A = Z + N)$ en un núcleo atómico. Los núcleos de los diferentes elementos pueden tener el mismo número másico.

Oscilaciones de neutrinos. Fenómeno postulado según el cual los neutrinos cambian periódicamente desde una forma (neutrino electrónico, neutrino muónico o neutrino tauónico) a otra durante el vuelo a través del espacio. No ha sido comprobado.

Parámetro de impacto Una medida del grado de solapamiento de las secciones eficaces de dos partículas que colisionan; es cero en una colisión idealizada perfectamente central y significativamente mayor que cero en una colisión periférica.

Paridad. Un principio fundamental de simetría que gobierna la naturaleza de las leyes de la física cuando las coordenadas espaciales del sistema son reflejadas completamente. El principio de paridad es obedecido (es

decir, la naturaleza no muestra preferencia espacial) en las interacciones electromagnéticas y fuertes, pero parece que se viola siempre en las débiles, tales como la desintegración beta.

Partícula alfa. Es el núcleo del helio-4, consiste de dos protones y dos neutrones. También es el producto de una desintegración radiactiva. Véase también *Partícula beta*.

Partícula beta. Sinónimo de un electrón o positrón cuando son emitidos en el proceso de desintegración beta. Véase también *Partícula alfa.*

Partícula de intercambio. Cualquier partícula virtual que actúa como el transporte de una fuerza entre dos partículas.

Partícula elemental. Una partícula que, hasta donde se conoce, no posee estructura interna. Los leptones, los quarks y los bosones vectoriales elementales son partículas elementales.

Partícula virtual. Una partícula, típicamente un bosón, cuya efímera vida sirve para transportar una fuerza entre dos partículas elementales. La partícula elemental aparece espontáneamente cerca de una de las dos partículas y desaparece cerca de la otra. Bajo ciertas condiciones, una partícula virtual puede convertirse en una partícula material.

Pión. El mesón más comúnmente observado existe en cualquiera de los tres estados de carga: positivo, negativo y neutro. Los piones virtuales existen en el núcleo y son importantes para comprender la estructura nuclear.

Plasma de quarks y gluones. Estado extremo de la materia en la cual los quarks y los gluones están desconfinados y son libres para moverse en un volumen mucho mayor que el de una simple bolsa hadrónica. Nunca ha sido observado en la Tierra.

Positrón. La antipartícula del electrón cargada positivamente.

Principio de exclusión. Véase *Principio de exclusión de Pauli*.

Principio de exclusión de Pauli. Una ley fundamental de la mecánica cuántica, obedecida por los fermiones pero no por los bosones, establece que en cualquier sistema de partículas, tal como un núcleo, no puede haber dos fermiones con el mismo estado cuántico. Juega un papel dominante en la determinación de las estructuras nucleares.

Principio de incertidumbre de Heisenberg. Ley fundamental de la mecánica cuántica que establece la imposibilidad de medir simultáneamente la posición y el momento de una partícula con precisión arbitrariamente grande; la estructura de la mecánica cuántica conduce a una ley similar para la energía y el tiempo. Juega un importante papel en los procesos nucleares.

Principio de incertidumbre. Véase *Principio de Heisenberg.*

Principio de simetría. Un principio fundamental que gobierna la naturaleza de las leyes físicas bajo el efecto de una transformación de simetría de cualquier tipo. Dos de los más importantes principios de simetría en física nuclear y de partículas son la invariancia de la paridad y de la inversión temporal.

Problema de muchos cuerpos. El problema matemático de describir el comportamiento dinámico de cualquier sistema de tres o más partículas mutuamente interactivas (tales como muchos núcleos).

Procesos permitidos. Cualquier proceso físico permitido por una teoría dada; puede ser que se haya observado o no. Véase también *Procesos prohibidos.*

Procesos prohibidos. Cualquier proceso físico prohibido por alguna teoría y que nunca se ha visto que ocurra. Si se observa, la teoría queda comprometida. Véase también *Procesos permitidos.*

Protón. Un barión cargado positivamente con una masa de 938 M*e*V, alrededor de 1.840 veces mayor que la del electrón.

Quark. Una de las tres clases de partículas elementales. Existen seis tipos básicos de quarks (sabores de los quarks) y seis antipartículas correspondientes. Los 12 quarks son fermiones e interactúan a través de la fuerza de color así como la débil. Todos poseen carga fraccional débil y están confinados en las bolsas hadrónicas. Véase también *Bosón vectorial elemental* y *Leptón.*

Radiactividad. Cualquiera de los diferentes tipos de procesos en los cuales un núclido cambia a otro núclido por emisión de una o más partículas.

Rayo gamma. Un fotón extremadamente energético que se emite en muchas reacciones nucleares y en la desintegración de muchos núclidos radiactivos y partículas inestables.

Reacción nuclear. Cualquier cambio producido en los estados de dos núcleos como consecuencia de la colisión de uno con otro.

Regla de la suma. Una regla que establece un límite superior a la magnitud de alguna cantidad dentro del marco de un modelo dado.

Relatividad. La teoría del espacio y el tiempo (relatividad especial) que describe la naturaleza de las leyes físicas en términos de postulados que conciernen a la velocidad de la luz y la observación del movimiento desde sistemas de referencia en movimiento.

Resonancia. Un gran aumento en la amplitud de oscilación de un sistema físico cuando actúa sobre él una fuerza que oscila cerca de una frecuencia particular, la frecuencia resonante del sistema. También se refiere a un extremadamente inestable (vida corta) estado de una partícula. Véase también *Resonancia bariónica.*

Resonancia bariónica. Un estado excitado de un barión que posee una masa mayor y una vida extremadamente corta. Las resonancias bariónicas más comunes son las resonancias nucleónicas y las delta.

Resonancia delta. Una resonancia bariónica; las resonancias delta difieren de las resonancias nucleónicas en el isospín.

Resonancia nucleónica. Una resonancia bariónica que se encuentra en un estado excitado de un nucleón; las resonancias nucleónicas y delta difieren en su isospín.

Sabor. El nombre de la propiedad que distingue los seis tipos básicos de quarks: arriba, abajo, extraño, encantado, valle y cima. Cada sabor puede tener cualquiera de los tres colores de los quarks.

Sección eficaz. Una medida de la probabilidad de que se produzca una interacción de un tipo dado; se expresa en unidades de área y es una de las cantidades medidas con más frecuencia en física.

Sincrotrón. Acelerador en forma de anillo en el cual la partícula cargada sigue una trayectoria circular fija a medida que recibe pulsos repetidos de energía a través de un campo de radiofrecuencia en un campo magnético variable.

Spin. Una propiedad intrínseca de todas las partículas y núcleos, análoga a la rotación sobre un eje. El spin, sin embargo, sólo aparece en forma

de múltiplos de una unidad de medida mecánico-cuántica. Las partículas que poseen un valor semientero son fermiones.

Tauón. Un leptón muy masivo, cargado negativamente, que parece ser idéntico al electrón excepto que su masa es mucho mayor. Véase también *Muon.*

Teoría cuántica de campos. Un formalismo matemático, basado en la relatividad y en la mecánica cuántica, que describe una de las fuerzas fundamentales. Las dos teorías más importantes son la electrodinámica cuántica y la cromodinámica cuántica.

Teoría de Gran Unificación. Un formalismo matemático que persigue la unificación de las fuerzas fuerte y electrodébil en una única fuerza, de manera similar a como la fuerza débil y el electromagnetismo se unificaron en la fuerza electrodébil.

Transición de fase. Un cambio en el estado físico de un sistema desde una forma a otra (por ejemplo de hielo a agua).

Variable de estado. Una de las cantidades medibles del conjunto mínimo cuyos valores son suficientes para definir el estado de un sistema físico dado y predecir su comportamiento sobre un amplio rango de condiciones. Véase también *Ecuación de estado.*

Vida media. El tiempo que emplean la mitad de los núcleos radiactivos de una muestra para desintegrarse; cada tipo de radionúclido posee una característica vida media.

FISICA NUCLEAR
ACADEMIA NORTEAMERICANA DE CIENCIAS

En todos los campos de la física se están registrando importantes y apasionantes avances, los cuales llevarán a la creación de un nuevo tipo de industrias, cambiarán el estudio del Universo, y afectarán a otras áreas del conocimiento y de la sociedad.

En este libro se analiza con detalle y rigor científico todo lo referente a la física nuclear: el pasado, el presente y el impresionante futuro; sus repercusiones o aplicaciones en otras ciencias, la astronomía, la geología, la medicina... Se trata, en definitiva, de un texto que reúne todos los conocimientos y posibilidades de la física nuclear.

A pesar de su terminología científica resulta un libro muy interesante para el lector de temas científicos y fundamental para los físicos.

La Academia Nacional Norteamericana de Ciencias, por medio de su departamento de prensa, ha publicado nueve libros que bajo el título *La física en los años 90* exponen los avances y conocimientos de los diversos campos o ramas de la física.

Física nuclear es uno de estos nueve títulos que, debido a su calidad, hemos querido incorporar en la colección Biblioteca Científica Salvat.

